

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA TEXTILNÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**LIBEREC 2013**

**BC. BOŽENA DAVÍDKOVÁ**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA TEXTILNÍ**



Studijní program: N3108 Průmyslový management

Studijní obor: N3108 Produktový management - Textil

**MODELOVÁNÍ PARAMETRU ÚČINNOST  
ELEKTROMAGNETICKÉHO STÍNĚNÍ  
TEXTILIÍ SE ZVÝŠENOU ELEKTRICKOU  
VODIVOSTÍ**

**MODELLING OF ELECTROMAGNETIC SHIELDING  
EFFECTIVENESS OF TEXTILES WITH INCREASED  
ELECTRIC CONDUCTIVITY**

Bc. Božena Davidková

KHT-194

**Vedoucí diplomové práce:** Ing. Veronika Šafářová

**Rozsah práce:**

Počet stran textu .. 91

Počet obrázků ..... 50

Počet tabulek ..... 22

Počet stran příloh.. 13

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Božena Davidková**  
Osobní číslo: **T10000104**  
Studijní program: **N3108 Průmyslový management**  
Studijní obor: **Produktový management - Textil**  
Název tématu: **Modelování parametru účinnosti elektromagnetického stínění  
textilií se zvýšenou elektrickou vodivostí**  
Zadávající katedra: **Katedra hodnocení textilií**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte literární rešerši na téma: a) elektromagnetické stínění plošných útvarů, b) základní požadavky na textilie odolné vůči elektromagnetickému smogu a c) možnosti přímého měření parametru účinnosti elektromagnetického stínění.
2. Prozkoumejte a kriticky vyhodnoťte použití různých přístupů modelování elektromagnetické stínící účinnosti publikovaných v odborných studiích.
3. Analyzujte vybrané textilie odolné vůči elektromagnetickému smogu z hlediska jejich elektrické vodivosti a odolnosti vůči elektromagnetickému stínění přímým měřením.
4. Navrhněte a realizujte stanovení účinnosti elektromagnetického stínění na základě znalosti: a) elektrických vlastností, b) konstrukčních parametrů studovaných textilií.
5. Získané výsledky vyhodnoťte, interpretejte, porovnejte s daty získanými přímým měřením a diskutujte vhodnost použití jednotlivých přístupů modelování.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 50 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. HAŇKA, L. Teorie elektromagnetického pole. Praha : SNTL, 1982. 578 s.
2. GEETHA, S., et al. EMI shielding: Methods and Materials - A Review. Journal of Applied Polymer Science. 2009, 112, s. 2073-2086.
3. DUQUESNE, S.; MAGNIEZ, C.; CAMINO, G. Multifunctional Barriers for Flexible Structures. Berlin : Springer-Verlag, 2007. 302 s. ISBN 0933-033X.
4. KÖNIG, H.; ERLACHER, P. Neviditelná hrozba? : Elektromagnetická pole kolem nás. HEL, 120 s. ISBN 80-86167-15-1.
5. PERUMALRAJ, R. et al. Electromagnetic Shielding Effectiveness of Copper Core-Woven Fabrics. Journal of the Textile Institute, 100(6), 2009, pp. 512-524.
6. WHITE, D. A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compoatibility Don White Consultants, 1971.
7. COLANERI, N. and SHACKLETTE, L. EMI Shielding Measurements of Conductive Polymer Blends. IEEE Trans. Instrum. Meas. 41(1), 1992, pp. 291-297.
8. CHEN, H. et al. Fabrication of Conductive Woven Fabric and Analysis of Electromagnetic Shielding via Measurement and Empirical Equation. Journal of MaterialsProcessing Technology, 184(1-3), 2007, pp. 124-130.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Veronika Šafářová  
Katedra hodnocení textilií

Datum zadání diplomové práce:


31. října 2012

Termín odevzdání diplomové práce:

27. května 2013

  
Ing. Jana Drašarová, Ph.D.  
děkanka



  
Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2012

### **P r o h l á š e n í**

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce.

V Liberci dne 27.5. 2013

.....

Bc. Božena Davidková

## **PODĚKOVÁNÍ**

Ráda bych poděkovala všem, kteří se jakýmkoliv způsobem podíleli na vzniku mé diplomové práce. Děkuji Ing. Veronice Šafářové za vedení práce, za konzultace, za vstřícný přístup a poskytnutí materiálů pro vypracování této práce. Nemalý dík patří celé mé rodině a přátelům, kteří stáli při mně a podporovali mě hlavně psychicky.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá studiem parametru účinnosti elektromagnetického stínění textilií se zvýšenou elektrickou vodivostí a jeho modelováním. Teoretická část seznamuje s problematikou elektromagnetického záření a zdravotními riziky s ním spojenými. Dále se tato část práce věnuje také charakteristickým elektrickým vlastnostem materiálů a rozebrány jsou základní přístupy ke tvorbě elektricky vodivých textilií. V rešeršní části práce jsou shrnuty způsoby přímého měření elektromagnetického stínění. Nemalá část rešeršní části práce je věnována možnostem nepřímého stanovení účinnosti elektromagnetického stínění pomocí matematických modelů založených zejména na znalosti elektrických vlastností a geometrických charakteristik stínící přepážky. Experimentální část je zaměřena na ověření funkčnosti jednotlivých typů navržených matematických modelů pro výpočet stínící účinnosti v původní formě, ověřeny jsou možnosti optimalizace vztahů použitelných pro textilní struktury (aproximační metoda, studium porozity textilií pomocí obrazové analýzy) a na závěr je provedeno zhodnocení vhodnosti použití jednotlivých přístupů modelování.

**Klíčová slova:** elektromagnetické záření, efektivita stínění, elektrická vodivost, matematické modelování, optimalizace

## **ABSTRACT**

This thesis studies the efficacy parameter of electromagnetic shielding of textile material with increased electric conductivity and its modelling. The theoretical part introduces the problems of electromagnetic radiation and health risks associated with it. Furthermore, this part also deals with the characteristic electrical properties of materials and discussed are the basic approaches to the production of electrically conductive textiles. In the search part of this work methods of direct measurement of electromagnetic shielding are resumed. A large part of the search part is dedicated to indirect determination of effectiveness of electromagnetic shielding using mathematical models based mainly on knowledge of the electrical properties and geometrical characteristics of the shielding barrier. The experimental part focuses on the verification of the functionality of each type of the proposed mathematical models to calculate shielding effectiveness in its original form, verified are

the possibilities of optimizing relationships applicable to textile structures (approximate method, the study of porosity of textile by image analysis) and finally, an evaluation of the suitability of each modelling approach.

**Key words: electromagnetic interference, shielding effectiveness, electrical conductivity, mathematical modelling, optimization**



# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	9
I. ÚVOD.....	10
II. REŠERŠNÍ ČÁST.....	12
1 Elektromagnetické záření .....	12
1.1 Druhy elektromagnetického záření .....	12
1.1.1 Ionizující záření .....	13
1.1.2 Neionizující záření .....	13
1.2 Elektromagnetické pole a zdravotní rizika.....	14
1.2.1 Zdravotní rizika ionizujícího záření.....	14
1.2.2 Zdravotní rizika neionizujícího záření .....	15
2 Elektrické vlastnosti materiálů .....	16
2.1 Elektrická vodivost.....	16
2.2 Elektrický odpor.....	16
2.3 Možnosti zvýšení elektrické vodivosti textilních materiálů.....	17
2.3.1 Kovová vlákna .....	19
2.3.2 Pokovená vlákna .....	20
2.3.3 Kompozitní polymerní vlákna .....	20
2.3.4 Vlákna z vodivých polymerů .....	20
2.3.5 Bikomponentní vlákna .....	20
2.3.6 Uhlíková vlákna a nanovlákna.....	21
3 Elektromagnetické stínění .....	22
3.1 Mechanismy stínění .....	22
4 Efektivita stínění.....	24
4.1 Přímé metody stanovení efektivity stínění .....	24
4.1.1 Metoda otevřeného pole nebo volného prostoru.....	25
4.1.2 Metoda stíněné schránky .....	25
4.1.3 Metoda stíněného prostoru.....	26
4.1.4 Metoda koaxiálního přenosového vedení .....	27
4.2 Numerické metody stanovení efektivity stínění.....	28
4.2.1 Modely založené na elektrických vlastnostech plošné textilie .....	28
4.2.2 Modely založené na struktuře plošné textilie .....	30
4.2.3 Kombinace modelů .....	33

III. PRAKTICKÁ ČÁST .....	34
5 Studované materiály .....	34
6 Hodnocení elektrických vlastností .....	35
7 Přímé hodnocení elektromagnetického stínění.....	36
8 Zjišťování porozity tkanin .....	37
8.1 Obrazová analýza .....	37
8.1.1 Proces zpracování obrazu .....	38
8.1.2 Výsledky obrazové analýzy .....	41
9 Aplikace modelů založených na elektrických vlastnostech textilií .....	44
9.1 Optimalizace konstant modelů .....	62
9.1.1 Optimalizace modelu (19) .....	63
9.1.2 Optimalizace modelu (24) .....	65
10 Zeslabení účinnosti stínící přepážky způsobené otvory v oblasti vazných bodů	67
11 Kombinace obou přístupů .....	69
11.1 Kombinace s modelem (19) .....	69
11.2 Kombinace s modelem (15) .....	75
IV. ZÁVĚR.....	82
Použitá literatura .....	86
Seznam obrázků.....	90
Seznam tabulek .....	91
Přílohy.....	92

## Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Veličina	Jednotka
$c$	rychlost šíření vlny	km/h
$\lambda$	vlnová délka	m
$f$	frekvence	Hz
$I$	proud	A
$U$	napětí	S/m
$S_V$	plocha příčného řezu	m <sup>2</sup>
$\sigma$	konduktivita	S/m
$\rho$	objemová rezistivita	$\Omega \cdot m$
$\rho_s$	plošná rezistivita	$\Omega$
$SE$	efektivita elektromagnetického stínění	dB
$R$	útlum odrazem	dB
$A$	absorpční útlum	dB
$M$	útlum vlivem mnohonásobných odrazů	dB
$Z_0$	vlnová impedance volného prostoru	$\Omega$
$Z_M$	vlnová impedance materiálu	$\Omega$
$\mu$	relativní permeabilita	H/m
$t$	tloušťka materiálu	m
$\delta$	hloubka vniku elektromagnetického pole do materiálu	m
$E$	intenzita elektrického pole	V/m
$H$	intenzita magnetického pole	A/m
$l$	šířka otvoru	m
$s$	výška otvoru	m
$L$	maximální velikost otvoru	m
$S$	minimální velikost otvoru	m
$d$	průměr otvoru	m
$a$	plocha	m <sup>2</sup>
$K$	korekční člen	dB

# I. ÚVOD

Elektromagnetickému záření byli lidé vystaveni již od pradávna. Před příchodem průmyslové revoluce však byly zdroje záření omezeny pouze na přírodní, například blesky. V průběhu 18. a 19. století prošlo výraznými změnami zemědělství, výroba, těžba, doprava i komunikace. S těmito změnami se objevily i nové zdroje elektromagnetického záření. Postupem času se zařízení vytvářející elektromagnetické pole vyvíjela až do podoby, kterou známe dnes.

V současnosti si život bez těchto elektrických a elektronických přístrojů a zařízení už nedovedeme ani představit. Dennodenně využíváme mobilní telefony a počítače jak k práci, tak i při odreagování. Neodmyslitelnou součástí kuchyní jsou mikrovlnné trouby a další velké množství elektromagnetického záření produkuje například lékařské diagnostické přístroje.

Všechny tyto přístroje a mnohé další jsou producenty elektromagnetického záření, které je nežádoucí a je neodmyslitelně spojeno i se zdravotními riziky. Vědečtí pracovníci na celém světě se účinkům působení elektromagnetického pole na zdraví člověka věnují již mnoho let. Předmětem výzkumu bývají zpravidla účinky dlouhodobého vystavení elektromagnetickému záření, ani krátkodobé vystavení však není opomíjeno. Nejen zdraví člověka je elektromagnetickým zářením ovlivňováno. Elektromagnetické pole může nepříznivě ovlivňovat i další přístroje a zařízení a vyvolávat tak rušení.

Nesmíme ovšem zapomínat na přírodní zdroje záření, které se přes veškerý technický pokrok ani dnes nevytratily. Přírodní zdroje však člověk není schopen ovlivňovat, v takovém případě se dá pouze předcházet následkům rušivých signálů. V centru pozornosti jsou tedy zdroje umělé, tedy takové zdroje, které svou činností vytvořil člověk.

S rostoucím počtem elektrických a elektronických přístrojů a zařízení, která produkují elektromagnetické záření, roste i potřeba ochrany a tudíž i poptávka po vhodných ochranných materiálech. Předpokladem ochrany proti elektromagnetickému záření je zvýšená elektrická vodivost materiálu. Aktuálně proto patří mezi nejpoužívanější elektromagneticky stínící materiály měď a další kovové prvky. Nicméně, v současné době roste poptávka po elektromagnetické ochraně na bázi flexibilních a lehkých materiálů, zejména pro výrobu ochranných oděvů.

Efektivitu neboli účinnost elektromagnetického stínění lze zjistit dvěma způsoby. Může být měřena přímo (bylo však zjištěno, že výsledky získané různými měřicími přístupy jsou mezi sebou neporovnatelné, jednotlivé metodiky jsou často velice náročné na přípravu vzorků a časově zdlouhavé) nebo je možno ji vypočítat na základě matematických vztahů založených na znalosti zejména elektrické vodivosti a struktury stínící přepážky.

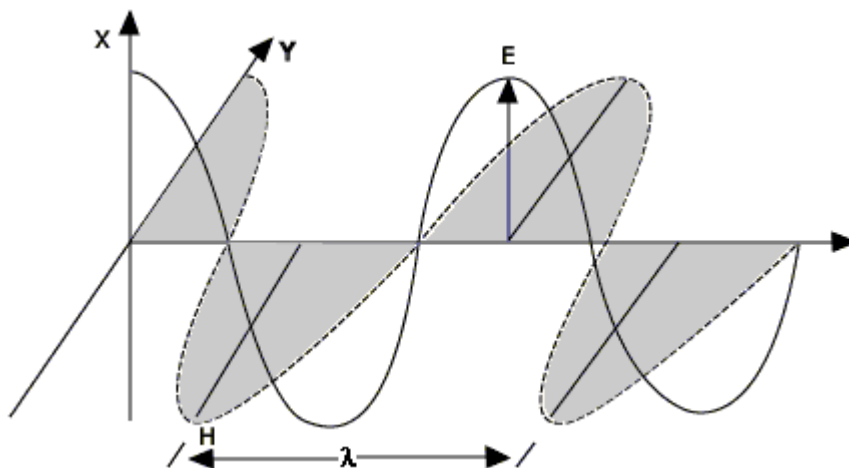
Cílem této diplomové práce bylo provést rozsáhlou literární rešerši ohledně současného stavu v oblasti predikce a modelování stínící účinnosti a vytipovat matematické modely vhodné pro predikci efektivity stínění elektromagnetického záření. Modely jsou založené na předpokladu znalosti základních jednoduše měřitelných charakteristik, jako je např. elektrická vodivost. Dalším cílem bylo tyto modely aplikovat na sadu textilií se zvýšenou elektrickou vodivostí, optimalizovat a kombinovat různé přístupy tak, aby výsledkem byl model vhodný pro predikci účinnosti elektromagnetického stínění textilních materiálů. První skupina modelů však vychází z předpokladu, že stínící přepážka je kompaktní materiál neobsahující žádné nespojivosti. Textilie jsou ovšem charakteristické svými otvory v oblasti vazných bodů. Bylo zjištěno, že tyto otvory efektivitu stínění elektromagnetického záření mohou výrazně snižovat. Další část práce se proto zabývá studiem vlivu porozity tkanin, která byla hodnocena s využitím obrazové analýzy na snížení účinnosti stínění. Na závěr je provedeno zhodnocení vhodnosti použití jednotlivých přístupů modelování.

## II. REŠERŠNÍ ČÁST

### 1 Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření je příčné postupné vlnění, složené z magnetické složky (H-pole) a elektrické složky (E-pole). Tyto dvě složky jsou na sebe navzájem kolmé a zároveň jsou kolmé na směr šíření.

Vlna je charakterizována rychlostí šíření ( $c$ ), vlnovou délkou ( $\lambda$ ) a frekvencí ( $f$ ). Rychlost šíření se rovná rychlosti světla ve vakuu. Ta je definována přesnou hodnotou 1 079 252 848,8 km/h. Vlnová délka je vzdálenost dvou nejbližších bodů vlnění, které fázově kmitají. Frekvence neboli kmitočet je počet opakování periodického děje za časovou jednotku. Nejjednodušším typem šíření elektromagnetického záření je rovinná vlna, znázorněná na obrázku 1 [28].



Obrázek 1: Typický model sinusové rovinné vlny

#### 1.1 Druhy elektromagnetického záření

James Clerk Maxwell zjistil, že světelný paprsek je postupná vlna tvořená elektrickým a magnetickým polem. V polovině 19. století bylo viditelné infračervené a ultrafialové světlo jediné známé. Heinrich Hertz na Maxwelllovu práci navázal objevem rádiových vln a zjištěním, že se v prostoru šíří stejnou rychlostí jako viditelné světlo. V současnosti známe široké spektrum elektromagnetických vln zvané též „Maxwellova duha“ [3]. Elektromagnetické záření se ale obecně dělí na ionizující a neionizující.

### 1.1.1 Ionizující záření

Jako ionizující záření je označováno záření s frekvencí  $10^{15}$  a vyšší o vlnových délkách menších než 1nm. Tento typ záření dobře reaguje s hmotou, má dostatečně velkou energii na odtržení jednoho nebo více elektronů z obalu atomu. Ionizující záření se v současnosti uplatňuje například v lékařství, v průmyslu nebo třeba i při letištních kontrolách.

Zdroje vyzařující ionizující záření dělíme na přirozené a umělé. Zatímco přirozené zdroje působí na člověka od nepaměti, umělým zdrojům není lidstvo vystaveno příliš dlouho. Mezi přirozené zdroje se řadí záření dopadající na Zemi z vesmíru, jeho producenty jsou Slunce, hvězdy a další kosmické objekty, a záření pozemské, jehož zdrojem je samotný zemský povrch. Umělé zdroje ionizujícího záření jsou vytvořeny člověkem a jsou využívány především ve zdravotnictví. Nejznámějším a zároveň i nejvyužívanějším je dozajista rentgenový přístroj. Mezi další zdroje patří PET (pozitronová emisní tomografie) nebo třeba CT (počítačová tomografie). Mimo zdravotnictví jsou důležitými zdroji i jaderné elektrárny [11].

### 1.1.2 Neionizující záření

Frekvence neionizujícího záření se pohybuje v rozmezí 0 až  $10^{15}$ Hz. Takové záření nemá dostatečnou energii potřebnou k odtržení elektronů z obalu atomu. Část neionizujícího záření je člověk schopen vnímat smysly. Jedná se o záření viditelné, infračervené a ultrafialové. Vlnová délka viditelného záření se pohybuje v rozmezí 380 – 780nm a člověk jej vnímá očima. Infračervené záření člověk nevidí, ale cítí jej jako ohřívání kůže a ultrafialové záření způsobuje hnědnutí kůže. Další část už člověk smysly není schopen vnímat [11;12].

Následující tabulka obsahuje přehled známých druhů ionizujícího a neionizujícího záření seřazených podle vlnové délky a jí odpovídající frekvence.

Název	Vlnová délka [m]	Frekvence [Hz]
gama záření	$10^{-10} - 10^{-14}$	$10^{19} - 10^{24}$
rentgenové záření	$(10 - 0,1) \cdot 10^{-9}$	$10^{16} - 10^{19}$
ultrafialové záření	$(380 - 10) \cdot 10^{-9}$	$10^{14} - 10^{16}$
viditelné záření	$(780 - 380) \cdot 10^{-9}$	$10^{14}$
infračervené záření	$10^{-3} - 10^{-6}$	$10^{10} - 10^{14}$
mikrovlny (EHF)	$10^{-2} - 10^{-3}$	$(30 - 300) \cdot 10^9$
mikrovlny (SHF)	$10^{-1} - 10^{-2}$	$(3 - 30) \cdot 10^9$
ultra krátké vlny (UKV)	1 - 0,1	$(0,3 - 3) \cdot 10^9$
velmi krátké vlny (VKV)	10 – 1	$(30 - 300) \cdot 10^6$
krátké vlny (KV)	100 – 10	$(3 - 30) \cdot 10^6$
střední vlny (SV)	$10^3 - 10^2$	$(0,3 - 3) \cdot 10^6$
dlouhé vlny (DV)	$10^4 - 10^3$	$(30 - 300) \cdot 10^3$
velmi dlouhé vlny	$10^5 - 10^4$	$(3 - 30) \cdot 10^3$
extrémně dlouhé vlny	$10^7 - 10^5$	$3 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^3$

Tabulka 1: Elektromagnetické spektrum <sup>[4]</sup>

## 1.2 Elektromagnetické pole a zdravotní rizika

S elektromagnetickým zářením jsou neodmyslitelně spjata i zdravotní rizika, která souvisí s tepelným a netepelným vyzařováním elektromagnetického pole. Účinky záření se staly předmětem mnohých výzkumů biologů i fyziků, patří mezi ně i Andreas Varga, Herbert König nebo Norbert Leitgeb. Nejčastěji se výzkumy zaměřují na účinky dlouhodobého vystavení. Zajímavé jsou však i studie krátkodobých vystavení, mezi které patří například nespavost, nervozita a další.

Odborníci se ale stále v otázce zdravotních rizik nemohou shodnout, zda lidský organismus ovlivňuje pouze tepelná složka elektromagnetického pole nebo zda při dlouhodobém působení elektromagnetického pole existují i rizika způsobená netepelnými složkami [10;16].

### 1.2.1 Zdravotní rizika ionizujícího záření

I malé množství ionizujícího záření působí negativně na buňky. Buňka zasažená ionizujícím zářením toto záření absorbuje. Na základě dávky a účinku ionizujícího záření rozlišujeme deterministické účinky a účinky stochastické.

#### Deterministické účinky

Po nadměrném vystavení ionizujícímu záření, kdy absorbovaná dávka překročí prahovou hodnotu pro danou tkáň, dochází k odumírání buněk, poškozování tkání



i celého organismu. Řadí se sem například nemoc z ozáření nebo akutní radiační syndrom. Se zvyšující se dávkou záření roste závažnost těchto účinků.

### **Stochastické účinky**

V případě vystavení organismu podprahovým dávkám ionizujícího záření nedochází k odumírání buněk a poškození tkání. Dochází však ke změnám v genetické informaci buňky. Zvyšuje se tak pravděpodobnost výskytu zhoubných nádorů, leukémie a genových mutací. Tyto procesy mohou být vyvolány i velmi malou dávkou ionizujícího záření [11;13].

## **1.2.2 Zdravotní rizika neionizujícího záření**

Jak již bylo výše zmíněno, mezi neionizující záření se řadí ultrafialové, viditelné a infračervené záření.

### **Ultrafialové záření**

Vystavení ultrafialovému záření může mít účinky příznivé i negativní. Vystavení malému množství ultrafialového záření je pro organismus důležité a prospěšné. Vystavení vyšším dávkám je však životu nebezpečné. Ultrafialové záření má nepříznivé účinky především na oči a kůži. Nejrizikovější je vlnová délka kolem 270nm.

### **Viditelné záření**

Určitá dávka viditelného záření je pro správné fungování lidského organismu nezbytná. Nejvhodnější je přirozené denní světlo. Užívání výbojek a zářivek přispívá ke zrakové únavě. Pro laserové zdroje platí zvláštní předpisy. Takové zdroje mohou poškozovat přímo sítnici oka. Intenzivní viditelné záření může způsobovat například i zánět spojivek.

### **Infračervené záření**

Při vysokých intenzitách infračerveného záření vzniká tepelný efekt, který může vést až ke vzniku popálenin. Může dojít k celkovému přehřátí organismu (úžeh) nebo k přehřátí hlavy (úpal). Oba stavy jsou doprovázeny nevolností, bolestmi hlavy a mohou vyvolávat epileptické nebo epileptiformní křeče [11;12].

## 2 Elektrické vlastnosti materiálů

Zvýšená elektrická vodivost materiálů je jedním ze základních předpokladů získání určité úrovně elektromagnetického stínění vzorků. Textilie obecně se jeví jako vhodný materiál pro elektromagnetické bariéry zejména díky nízké hmotnosti, nízkým výrobním nákladům a vysoké flexibilitě. Aby však mohly být využitelné pro účely elektromagnetického stínění, musí vykazovat především dostatečně vysokou elektrickou vodivost.

Zvýšená vodivost textilií se dnes využívá například i u antistatických úprav. Pro tvorbu elektromagneticky stínících bariér musí být však vodivost bariéry ještě vyšší, ovšem nemusí nutně dosahovat vodivosti jako kovy. Neplatí zde pravidlo, že čím vyšší vodivost, tím vyšší účinnost stínění. Efektivitu stínění ovlivňuje i další řada faktorů, které budou zmíněny dále.

### 2.1 Elektrická vodivost

Elektrická vodivost je fyzikální veličina popisující schopnost materiálu vést elektrický proud. Látky umístěné v elektrickém poli se dělí na vodiče a izolátory. Pro vodiče je charakteristický transport elektricky nabitých částic. Čím vyšší vodivost je, tím silnější elektrický proud prochází při stejném napětí vodičem. Izolátory naopak energii akumulují. Vodivost je poměr elektrického proudu  $I$  protékajícího vodičem a elektrického napětí  $U$  na koncích vodiče.

Pro hodnocení materiálů se využívá parametru nazývaní se měrná elektrická vodivost  $\sigma_E$  [ $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ ], jinak zvané konduktivita. Ta při výpočtu pro délkové textilní útvary bere v úvahu příčný řez vlákna a jeho délku, je dána vztahem (1).

$$\sigma_E = \frac{I * l_v}{U * S_v} \quad (1)$$

kde  $I$  je procházející proud [A],  $l_v$  je délka vodiče [m],  $U$  je napětí mezi koncovými body vodiče [V] a  $S_v$  je plocha příčného řezu [ $\text{m}^2$ ] [14;15].

### 2.2 Elektrický odpor

Elektrický odpor je druhou fyzikální veličinou charakterizující schopnost materiálů vést elektrický proud. Jedná se o převrácenou hodnotu elektrické vodivosti.

Stejně jako odpor je převrácenou hodnotou vodivosti, měrný elektrický odpor, nebo-li rezistivita  $\rho_E$  [ $\Omega \cdot \text{m}$ ], je převrácenou hodnotou měrné elektrické vodivosti, tedy konduktivity. Rezistivita je dána vztahem (2) [14;15].

$$\rho_E = \frac{1}{\sigma_E} \quad (2)$$

V tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty měrného elektrického odporu vybraných vláken při 65% relativní vlhkosti a teplotě 20°C , které uvádí [14].

Vlákno	ln ( $\rho_E$ )
CO	5,6
WO	7,3
CV	5,8
SE	8,7
PA6	13
PA6.6	11
PAN	14
PES	17
PP	12,5

Tabulka 2: Měrný elektrický odpor vybraných vláken <sup>[14]</sup>

Podle hodnot konduktivity a rezistivity se látky dělí na vodiče, polovodiče a izolátory. Hodnota konduktivity u vodičů je vyšší než  $10^3 \text{ S.m}^{-1}$  a hodnota rezistivity se pohybuje v rozmezí  $10^{-8} - 10^{-2} \Omega.\text{m}$ . U polovodičů se konduktivita pohybuje mezi  $10^{-5}$  až  $10^3 \text{ S.m}^{-1}$ , hodnota rezistivity pak mezi  $10^{-2}$  až  $10^0 \Omega.\text{m}$ . U poslední skupiny, tedy izolátorů, jsou hodnoty konduktivity nižší než  $10^{-5} \text{ S.m}^{-1}$  a hodnoty rezistivity se pohybují v rozmezí  $10^0 - 10^{16} \Omega.\text{m}$  [14;15].

### 2.3 Možnosti zvýšení elektrické vodivosti textilních materiálů

Jedním z požadavků na tvorbu bariérních textilií zabráňujících průchodu elektromagnetického záření je zvýšená elektrická vodivost. Většina textilních vláken však působí spíše jako izolátory. Elektrická vodivost vláken však není nulová. Je závislá na obsahu různých přísad a také obsahu vlhkosti.

Na oděvní textilie jsou kladeny nejrůznější požadavky za účelem dosažení vysokého komfortu nošení. Při tvorbě vodivých textilií pro oděvní aplikace je proto nutné brát v úvahu jistá omezení. Jak uvádí článek [28], oděvní textilie by měly být ohebné a pružné. Musí mít nízký ohybový a smykový odpor, aby byly snadno deformovatelné a splývavé. Pro dosažení pružnosti by vlákna měla být jemná,

dosahovat jemnosti menší než 1 tex a plošná hmotnost textilie by neměla překročit hranici 300g/m<sup>2</sup>.

Tyto požadavky jsou neslučitelné s materiály a tvary, které jsou potřebné pro docílení elektrické vodivosti klasickými způsoby. Kovy, uhlík a vodivé polymery jsou vcelku tuhé a křehké materiály. Textilní inženýrství pracuje na vývoji tvorby vláken a vytváří nové možnosti, jak vyrábět vodivé textilie z těchto materiálů. Základních pět metod tvorby vodivých textilií uvádí [26]. Patří mezi ně:

- použití vodivých vláken. Vodivá vlákna mohou být rozdělena do dvou základních skupin. Jedná se o přirozeně vodivá vlákna (např. kovová a uhlíková vlákna) a vlákna, která jsou speciálně zpracována pro docílení zvýšené elektrické vodivosti (vlákna povrstvená či plněná vodivými částicemi), jak bylo uvedeno výše. Tato vlákna mohou být použita přímo (netkané textilie), v ostatních případech výroby textilních struktur je nutno vyrobit příze, které mohou být buď ze 100% vodivého vlákna, či směsové příze, obsahující i vlákna nevodivá.
- povrstvené textilie. Nevodivé textilie je možno po výrobním procesu zpracovat za účelem nanesení vodivé vrstvy. Takovéto vodivé vrstvy mohou být tvořeny např. kovem nebo vodivými polymery. Po tomto kroku mají tyto textilie zvýšenou povrchovou vodivost.
- rozptýlení elektricky vodivých částic do připravené textilie. Nevodivá textilie (zejména netkaná) je používána jako substrát, na který jsou nanесeny vodivé částice, jako jsou saze nebo kovové částice. Tímto způsobem je dosaženo požadovaného stupně vodivosti textilie.
- potištěné textilie. Elektricky vodivá struktura je nanесena tiskařskými technikami (např. sítotiskem) na připravenou nevodivou textilií.
- prošívání textilie. Vodivá struktura je vyšita elektricky vodivými nitěmi na nevodivou textilií.

Každá z uvedených metod tvorby textilií se zvýšenou vodivostí skýtá určité výhody a nevýhody. Pro tvorbu bariérních textilií se zdá být výhodné využití začlenění např. velmi jemných elektricky vodivých částic do struktury příze, jejichž přídavek výrazně nezmění mechanické a další vlastnosti výsledné textilie, a při tom bude

dosaženo dostatečně vysoké elektrické vodivosti pro zajištění cílené úrovně elektromagnetického stínění.

Mezi vlákna s vlastnostmi vhodnými pro další využití v oblasti elektromagnetického stínění textilních struktur, tzn. vlákna se zvýšenou elektrickou vodivostí, patří vlákna:

1. kovová
2. pokovená
3. kompozitní polymerní vlákna
4. vlákna z vodivých polymerů
5. bikomponentní vlákna
6. uhlíková vlákna a nanovlákna

### **2.3.1 Kovová vlákna**

Kovová vlákna se v textilní oblasti využívala již od starověku a to především k dekorativním účelům. Zlatem a stříbrem se zdobila například roucha králů, vůdců a šlechty. I dnes se kovová vlákna hojně využívají při tkaní, pletení i výrobě netkaných textilií. Neplní už však pouze ozdobnou funkci. Díky svým vlastnostem, jako jsou zvýšená elektrická vodivost a tvarová stálost, jsou využívána především v oblasti technických textilií.

Kovová vlákna mohou být vyrobena z čistých kovů, polokovů nebo slitin. Díky svým zpracovatelským vlastnostem se běžně používají zlato, stříbro, hliník a měď. Mezi nejpoužívanější slitiny patří všechny formy ocele, slitiny železa, mědi nebo hliníku a další.

Pro výrobu kovových vláken existují různé metody. Obecně se dají rozdělit na metody mechanické a tepelné. Mezi mechanické metody patří například tažení drátu přes kónické otvory nebo řezání. Vytahování z taveniny se pak řadí mezi metody tepelné. Technologický postup výroby ovlivňuje tvar příčného řezu i povrchovou stálost. Čím jsou kovová vlákna jemnější, tedy jejich průměr je menší, tím větší pevnost v tahu vykazují, stejně tak roste i jejich ohebnost.

Výroba kovových vláken je velmi nákladná, jejich vlastnosti však nabízí široké spektrum využití. Mezi výhody kovových vláken patří tepelná odolnost, vysoká pevnost v tahu, ohebnost, ale i nehořlavost, nenasákavost nebo odolnost vůči chemikáliím. Nevýhodou je však jejich vysoká hustota způsobující problémy při směšování kovových vláken s vlákny obvykle používanými v textilním odvětví [26].

### **2.3.2 Pokovená vlákna**

Zvýšení elektrické vodivosti vláken lze dosáhnout také povrstvováním vláken. Pokovovat se lze nejen vlákna, nanášet elektricky vodivou vrstvu lze i na příze a hotové textilie. Povrstvovat lze jak přírodní tak chemická vlákna, nejčastěji se však využívá polyamid a polyester. Na jejich povrch se nanáší nejčastěji zlato, stříbro, měď a nikl. Dobré vodivosti je dosaženo bez velkých změn původních vlastností jako hmotnost, omak nebo flexibilita. Problémy při použití způsobuje relativně nízká mechanická odolnost vodivého nánosu na povrchu vlákna [27].

### **2.3.3 Kompozitní polymerní vlákna**

Vodivosti u kompozitních polymerních vláken je dosahováno rozptýlením vodivých částic v nevodivé polymerní matici. Dostatečný objem vodivých částic musí být náhodně rozptýlen v nevodivém polymeru, aby došlo k toku elektronů. Jako vodivá složka kompozitních polymerních vláken se nejčastěji používají uhlíkové saze, uhlíkové nanotrubičky, kovové částice a nanočástice solí kovů, které se stejně jako kovový prášek přimíchávají do roztoku polymeru. Nevýhodou je nutnost použití relativně vysokého obsahu vodivé komponenty tak, aby bylo dosaženo požadované elektrické vodivosti, což s sebou přináší výrazné zhoršení mechanických vlastností výsledného vlákna [27].

### **2.3.4 Vlákna z vodivých polymerů**

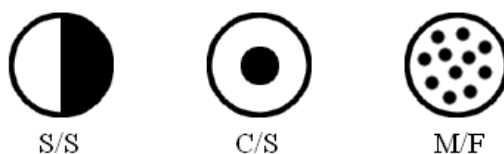
Vlákna z vodivých polymerů vykazují fyzikální a chemické vlastnosti polymerů a zároveň elektrické vlastnosti kovů. Jsou pevná, pružná, lehká a vysoce elektricky vodivá. Díky těmto vlastnostem jsou vhodná ke tkaní, pletení a pro další textilní výrobní procesy. Ne všechny vodivé polymerní materiály lze zvláknovat, takové tedy nejsou vhodné pro textilní struktury. Mezi ty nejpoužívanější, které lze zvláknovat, patří polyanilin, polyacetylen, polypyrrol, polythiopen a polyfenylenvinyle. Výhodou vláken z těchto polymerů je, že jejich elektrické vlastnosti lze snadno měnit například dloužením. V současné době se vodivé polymery používají s úspěchem zejména k povrstvování klasických nevodivých vláken. Vlákna tvořená pouze vodivým polymerem s vhodnými zpracovatelskými vlastnostmi jsou zatím ve fázi vývoje [26].

### **2.3.5 Bikomponentní vlákna**

Bikomponentní vlákna vznikají kombinací dvou různých komponent, ze kterých je vytvořeno jedno bikomponentní vlákno. Tato vlákna jsou charakteristická svými speciálními vlastnostmi, díky kterým nachází uplatnění v řadě aplikací. Nejpoužívanější

jsou v oděvním a nábytkářském průmyslu, stejně jako v medicíně nebo pro výrobu filtrů.

Jedná se o syntetická vlákna tvořená dvěma polymery s odlišnou fyzikální a/nebo chemickou strukturou. Oba polymery jsou pevně spojeny, zároveň ale mohou být odděleny. Výroba vláken probíhá zvlákňováním přes zvlákňovací trysku. Tvar zvlákňovací trysky udává druh bikomponentního vlákna. Rozlišují se tři typy vláken znázorněné na obrázku 2. Jsou to: typ strana/strana (S/S), kdy jsou oba polymery vedle sebe, typ jádro/plášť (C/S), ve kterém je jeden typ polymeru obklopen druhým a typ matrice/vlákno (M/F), kde jeden polymer vytváří více vláken ve druhém polymeru [26].



*Obrázek 2: Typy bikomponentních vláken*

### **2.3.6 Uhlíková vlákna a nanovlákna**

Uhlíkové vlákno je takové vlákno, které obsahuje minimálně 90% uhlíku. V současnosti se vyrábějí především z vláken polyakrylonitrilových. Postup výroby uhlíkových vláken se dá rozdělit na tři etapy. Jsou to stabilizace, karbonizace, grafitizace. Jednotlivé vlastnosti uhlíkových vláken jsou závislé na výchozím polymerním materiálu, na podmínkách karbonizace a tepelné úpravy a také na přidání aditiv.

Uhlíková vlákna mají specifické vlastnosti jako elektrickou vodivost, zejména v podélném směru mají nízký elektrický odpor. Dále nízkou hustotu, nízký až negativní koeficient tepelné roztažnosti a odolnost vůči elektrostatickému nabití. Vyznačují se anizotropií mechanických vlastností, ve směru kolmém k ose vlákna mají výrazně menší modul pružnosti. Jsou křehká, ale zároveň pevná [26].

### 3 Elektromagnetické stínění

S rapidním nárůstem přístrojů a zařízení produkujících elektromagnetické záření roste potřeba ochrany. Elektromagnetické stínění se využívá k tlumení elektromagnetických vln z externích zdrojů. V praxi jsou nejvyužívanějšími stínícími prvky kovy, nejčastěji ve formě plátů, které jsou vhodné k ochraně zařízení, ne však k ochraně osob.

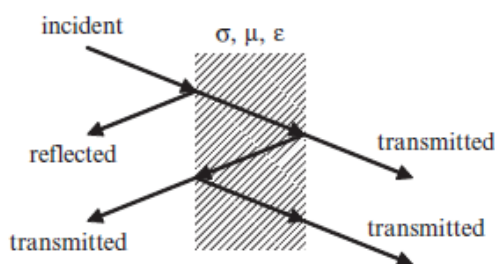
V současnosti jsou pro elektromagnetické stínění stále více využívány textilie. Výhodami textilních bariér jsou především jejich flexibilita, dobrá tvárnost, mechanické vlastnosti a ve srovnání s plechovými kryty i nižší výrobní náklady. Textilie používané jako elektromagnetické bariéry však musí vykazovat zvýšenou vodivost, jak již bylo zmíněno.

#### 3.1 Mechanismy stínění

K útlumu elektromagnetického pole přispívají tři základní mechanismy (3). Jsou to útlum odrazem  $R$ , absorpční útlum  $A$  a útlum vlivem mnohonásobných odrazů  $M$ .

$$SE = R + A + M \text{ [dB]} \quad (3)$$

Všechny tři mechanismy přispívají k účinnosti stínící přepážky z kompaktních materiálů a obvykle se udávají v dB. Jsou znázorněny na obrázku 3, který ilustruje dopadající záření na stínící přepážku.



Obrázek 3: Rovinná vlna dopadající na stínící přepážku <sup>[1]</sup>

Část dopadající vlny se odráží od bariéry na její přední straně (na impedančním rozhraní mezi vzduchem a např. pokovenou textilií), dochází tak k útlumu odrazem, který je dán vodivostí a permeabilitou stínící přepážky, není však závislý na tloušťce, jak ukazuje (4) a může být zjednodušen (5) matematickou úpravou [6].

$$R = 20 \log \left| \frac{(Z_0 + Z_M)^2}{4Z_0 Z_M} \right| \quad (4)$$



$$R = 168,14 + 20 \log \sqrt{\frac{\rho_r}{f \mu_r}} \quad (5)$$

kde  $Z_0$  je vlnová impedance volného prostoru,  $Z_M$  je vlnová impedance materiálu,  $f$  je frekvence a  $\mu_r$  je relativní permeabilita.

Další část vlny prostupuje stínící přepážkou směrem ke druhé straně. Během prostupu materiálem je vlna částečně absorbována a přeměněna na teplo. Absorpční útlum závisí na tloušťce materiálu  $t$  a hloubce vniku elektromagnetického pole do materiálu  $\delta$ , jak je patrné z (6). Zjednodušeného tvaru rovnice (7) je dosaženo matematickou úpravou [6].

$$A = 20 \log |e^{-t/\delta} e^{-j\beta_0 t} e^{j\beta t}| \quad (6)$$

$$A = 8,6859 \frac{t}{\delta} \quad (7)$$

kde  $t$  je tloušťka materiálu,  $\delta$  je hloubka vniku elektromagnetického pole do materiálu a  $\beta$  je fázová konstanta.

Hloubka vniku elektromagnetického pole do materiálu  $\delta$  je dána (8) [5].

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (8)$$

Zbývající část vlny se odráží od zadní strany bariéry, dochází tak k útlumu vlivem mnohonásobných odrazů uvnitř stínící přepážky. Útlum je definován (9) [6].

$$M = 20 \log \left| 1 - e^{-2t/\delta} e^{-j2\beta t} \left( \frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M} \right)^2 \right| \quad (9)$$

V případě dobře vodivých materiálů může být útlum vlivem mnohonásobných odrazů zanedbán. Materiál stínící přepážky je považován za dobře vodivý v případě, že splňuje podmínku  $Z_M \ll Z_0$ , tedy jeho vlnová impedance je mnohonásobně menší než vlnová impedance vzduchu [7].

## 4 Efektivita stínění

Stínění je dosaženo snížením intenzity elektrického a magnetického pole rovinné vlny stínicí přepážkou. Efektivita stínění je definována jako poměr elektrického (nebo magnetického) pole dopadajícího na stínicí přepážku a elektrického (nebo magnetického) pole, které projde přepážkou. V praxi se většinou používá logaritmická míra tohoto koeficientu[1]. Stínicí efektivitu (10) pro elektrické pole a (11) pro magnetické pole [dB] je možno vyjádřit jako

$$S_E = 20 \log_{10} \left| \frac{E_i}{E_t} \right|, \quad (10)$$

$$S_H = 20 \log_{10} \left| \frac{H_i}{H_t} \right|, \quad (11)$$

kde  $E_i$  ( $H_i$ ) je intenzita elektrického (magnetického) pole dopadajícího na stínicí přepážku a  $E_t$  ( $H_t$ ) je intenzita elektrického (magnetického) pole propuštěného přepážkou.

Efektivita stínění je závislá především na materiálu, ze kterého je stínicí přepážka vyrobena a na jeho tloušťce. Závisí ale také na frekvenci a vzdálenosti zdroje záření od stínicí přepážky. Velký vliv na účinnost mají ale i nespojitosti přepážky, jako jsou například mezery, trhliny nebo otvory, které ji dramaticky snižují, a to zejména při vyšších frekvencích [8].

### 4.1 Přímé metody stanovení efektivity stínění

V současnosti se používají celkem čtyři přímé metody hodnocení efektivity elektromagnetického stínění. Jsou to:

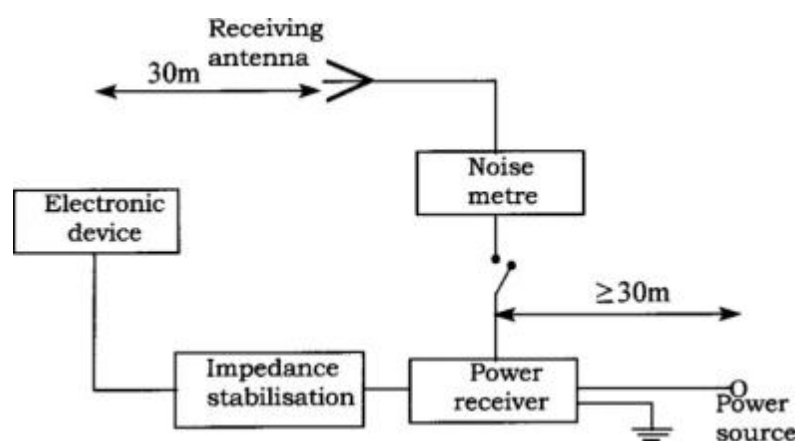
- metoda otevřeného pole nebo volného prostoru
- metoda stíněné schránky
- metoda stíněného prostoru
- metoda koaxiálního přenosového vedení

Jak bude popsáno dále, je zřejmé, že každá z popisovaných měřících metod skýtá určité výhody a nevýhody týkající se časové náročnosti přípravy vzorku či samotného měření. Existuje několik používaných metod, avšak pro rovinné struktury v současné době neexistuje jednotná norma, která by ošetřovala hodnocení malých vzorků rozměrů několika desítek centimetrů. Porovnávání publikovaných úspěchů na poli vývoje textilií se zvýšenou odolností vůči elektromagnetickému smogu je tedy

nesnadné. Jako jednodušší se zdá být využití předpokladu, že pro dostatečně vysoké frekvence převládá elektrická složka elektromagnetického pole, a proto by pro stanovení účinnosti elektromagnetického stínění vzorků mohlo být využito znalosti jejich elektrických vlastností, jež jsou snadno měřitelné.

#### 4.1.1 Metoda otevřeného pole nebo volného prostoru

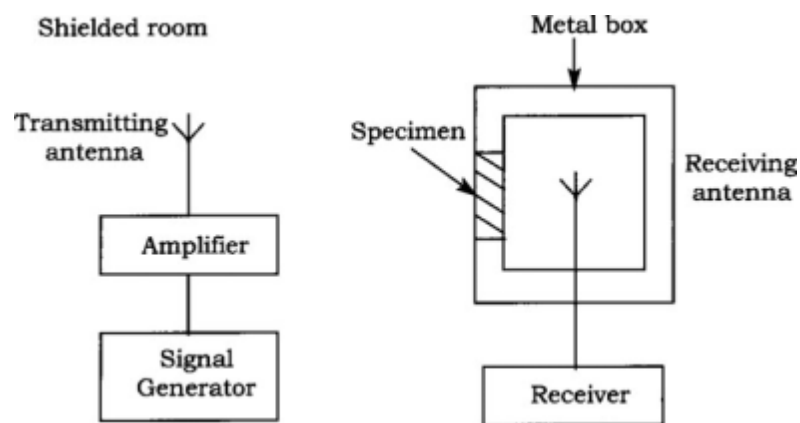
Metoda otevřeného pole nebo volného prostoru je navržena pro přímé měření emisí vyzařovaných konečnými produkty. Metoda zahrnuje montáž měřicího zařízení ve vzdálenosti 30 metrů od přijímací antény a následném zaznamenávání vyzařovaných emisí. Na obrázku 4 je metoda otevřeného pole znázorněna [17].



Obrázek 4: Metoda otevřeného pole <sup>[17]</sup>

#### 4.1.2 Metoda stíněné schránky

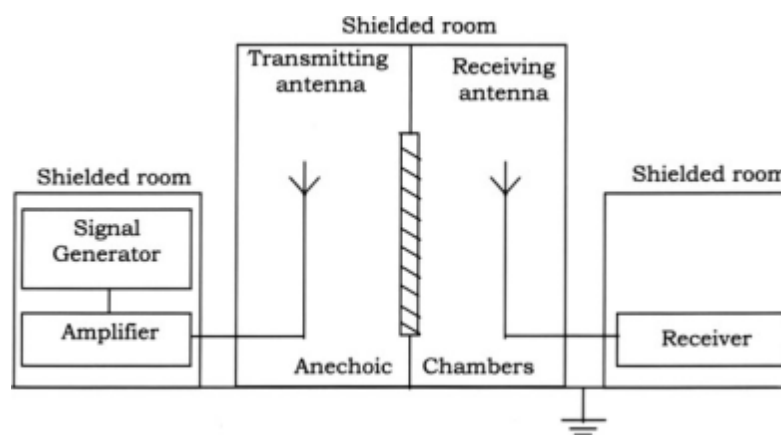
Metoda stíněné schránky se běžně využívá k porovnávání efektivity stínění různých stínících materiálů. K testu se využívá uzavřené kovové schránky, na jejíž jedné straně je otvor pro vzorek a uvnitř je umístěna přijímací anténa. Vysílací anténa je umístěna mimo schránku. Intenzita vysílaného signálu je zaznamenávána nejprve bez a poté i se vzorkem umístěným na vstupu tzv. vlnovodu. Poměr mezi signály představuje účinnost stínění. Nevýhodou této metody je, že se stává neúčinnou při frekvencích vyšších než 500MHz. Obrázek 5 znázorňuje princip měření touto metodou [17].



Obrázek 5: Metoda stíněného boxu<sup>[17]</sup>

#### 4.1.3 Metoda stíněného prostoru

Metoda stíněného prostoru je jednou z nejpropracovanějších metod. Princip měření je založený na metodě odstíněné schránky s tím rozdílem, že každá ze složek měřicího systému, tedy generátor signálu, přenosová anténa, přijímací anténa a záznamové zařízení, je umístěna v odděleném prostoru, aby byly eliminovány možnosti jakéhokoliv rušení. Eliminací rušení se snižuje riziko chyb. Velikost zkušebního vzorku je větší stejně jako rozsah frekvencí, při kterých lze efektivitu stínění měřit. V porovnání s metodou odstíněné schránky je tak dosahováno lepších výsledků. Metodu stíněného prostoru ilustruje obrázek 6 [17].

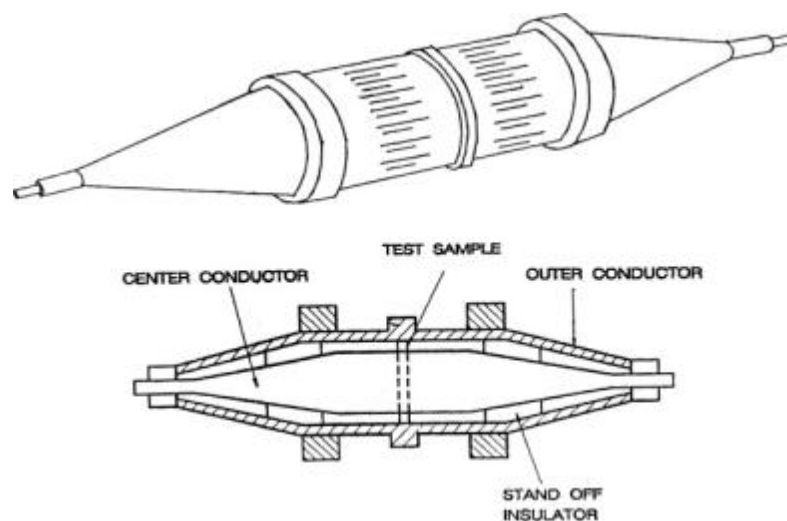


Obrázek 6: Metoda stíněného prostoru<sup>[17]</sup>

#### 4.1.4 Metoda koaxiálního přenosového vedení

Poslední, ale zároveň nejpreferovanější metodou přímého měření je metoda koaxiálního přenosového vedení. Překonává nevýhody předešlých metod a data získaná v různých laboratořích jsou v tomto případě porovnatelná. Na rozdíl od předchozích metod je možné metodou koaxiálního přenosového vedení získat informace o odražené, absorbované a přenesené složce elektromagnetického záření. Na obrázku 7 je znázorněno měření touto metodou.

Měřicí zařízení je třeba před vložením samotného testovaného vzorku zkalibrovat. Test se provádí na vzorku tvaru mezikruží, ten musí být v měřicím zařízení dobře upevněn upínacími šrouby. Měření je prováděno při různých frekvencích a výsledkem takového měření je křivka závislosti efektivity stínění na dané frekvenci [17].



Obrázek 7: Metoda koaxiálního vedení <sup>[17]</sup>

## 4.2 Numerické metody stanovení efektivity stínění

Přímé měření účinnosti elektromagnetického stínění vyžaduje využití speciálních zařízení, a jak bylo zjištěno, výsledky jsou navíc výrazně ovlivněny použitou měřicí metodou. Měření povrchové a objemové rezistivity je jednodušší. Z teorie je známo, že pro dostatečně vysoké frekvence je dostatečné měření pouze elektrické složky elektromagnetického pole. Z tohoto důvodu by mezi efektivitou elektromagnetického stínění a rezistivitou či vodivostí měl být matematický vztah.

Využívané numerické modely stanovení účinnosti elektromagnetického stínění lze rozdělit do dvou oblastí. Jedná se o modely založené zejména na:

- elektrických vlastnostech plošné textilie, zejména objemové rezistivitě,
- struktuře plošné textilie (analýza zeslabení účinnosti stínící přepážky způsobená otvory v oblasti vazných bodů).

### 4.2.1 Modely založené na elektrických vlastnostech plošné textilie

Materiál, ze kterého je vyrobena elektromagnetická bariéra, může být považován za dobře vodivý, pokud je jeho vlnová impedance  $Z_M$  mnohonásobně menší než impedance volného prostoru  $Z_0$ . V případě dobře vodivého materiálu je možné ve výpočtu účinnosti stínění zanedbat útlum vlivem mnohonásobných odrazů  $M$ , jak již bylo uvedeno dříve. Úpravou rovnice (3) je získán vztah pro účinnost stínění vodivých materiálů (12).

$$SE = R + A \quad (12)$$

$$R = 50 + 10 \log(\rho * f)^{-1} \quad (13)$$

$$A = 1,7t \left( \frac{f}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

kde  $R$  je odrazová složka [dB],  $A$  je absorpční složka [dB],  $\rho$  je objemová rezistivita vodivého materiálu [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] a  $f$  je frekvence [MHz].

Po dosazení složek (13) a (14) do rovnice (12) je získán výsledný vztah pro výpočet účinnosti stínění vodivého materiálu (15) [9].

$$SE = 50 + 10 \log(\rho * f)^{-1} + 1,7t \left( \frac{f}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Složky výše uvedeného vzorce pro výpočet účinnosti stínění dobře vodivých materiálů (12) jsou uváděny v odborné literatuře v různých modifikacích. Jedna

z dalších možností výpočtu je uvedena v práci [2]. Po dosazení modifikované odrazové složky  $R$  a absorpční složky  $A$  získá rovnice tvar (16).

$$SE = 168 - 10 \log \left( \frac{f\mu}{\sigma} \right) + 3,34t\sqrt{f\mu\sigma} \quad (16)$$

kde  $\mu$  je relativní permeabilita a  $\sigma$  je konduktivita [S/cm].

Nanokompozitům a elektromagnetickému stínění se věnuje práce [23]. Vztah pro výpočet účinnosti stínění má v této práci tvar (17).

$$SE = 20 \log \left( \frac{Z_0 \delta \sigma}{2\sqrt{2}} \right) + 8,68 \frac{t}{\delta} \quad (17)$$

kde  $Z_0$  je  $120\pi$ .

Bylo zjištěno, že v případě kdy bude poměr  $t/\delta \leq 1,3$ , bude mít rovnice pro výpočet efektivity stínění tvar (18).

$$SE = 20 \log \left( 1 + \frac{Z_0 t \sigma}{2} \right) \quad (18)$$

Modifikovaný vztah pro výpočet účinnosti stínění uvádí [2]. V modelu je uvažována vodivost mědi, vztah udává rovnice (19).

$$SE = 168 - 10 \log \left( \frac{K_C * f}{\sigma} \right) + 1,315t \sqrt{\frac{\sigma}{K_C * f}} \quad (19)$$

kde  $K_C$  je vodivost mědi ( $5,82 \cdot 10^5 \text{ S.cm}^{-1}$ ).

Další vzorce pro výpočet účinnosti elektromagnetického stínění na základě elektrických vlastností plošné textilie užívají rovnici (3). Vychází tedy ze součtu všech tří základních mechanismů stínění, útlumu odrazem  $R$ , absorpčního útlumu  $A$  a útlumu vlivem mnohonásobných odrazů  $M$ .

Jednomu z těchto modelů se ve své práci věnuje [5]. Konečná rovnice pro výpočet účinnosti stínění má tvar (20).

$$SE = 168 - 10 \log \frac{f\mu}{\sigma} + 131t\sqrt{f\mu\sigma} + 20 \log(1 - e^{-\frac{2t}{\delta}}) \quad (20)$$

V práci [18] se autor se věnuje elektromagnetickému rušení. Pro výpočet efektivity elektromagnetického stínění na základě elektrických vlastností uvádí vztah (21).

$$SE = 39,5 + 10 \log \frac{\sigma}{2\pi f \mu} + 8,7 d \sqrt{\pi f \mu \sigma} + 20 \log |1 - e^{t/\delta}| \quad (21)$$

Práce [19] uvádí rovnici (22), ve které jsou opět sečteny všechny tři základní mechanismy stínění.

$$SE = 168 + 10 \log \frac{\sigma}{\mu f} + 3,34 t \sqrt{f \mu \sigma} + 20 \log (1 - e^{-2t/\delta}) \quad (22)$$

Práce [20] se věnuje vlivu hustoty tkaniny na efektivitu stínění a uvádí další modifikaci, vycházející z rovnice (3). Po dosazení všech tří složek má rovnice tvar (23).

$$SE = 168,16 - 10 \log \frac{\mu f}{\sigma} + 1,31 t \sqrt{f \mu \sigma} + 20 \log (1 - e^{3,54 t \sqrt{f \mu \sigma}}) \quad (23)$$

Všechny výše uvedené vztahy pro výpočet efektivitu stínění na základě elektrických vlastností bariéry využívají objemové rezistivity. Zdroj [24] však uvádí tvar rovnice vycházející z povrchové rezistivity  $\rho_s$ . Rovnice má tvar (24).

$$SE = 20 \log \left( \frac{377 \sigma t}{2\sqrt{2}} \right) = 20 \log \left( \frac{377}{2\sqrt{2} \rho_s} \right) \approx 42,5 - 20 \log (\rho_s) \quad (24)$$

Numerická metoda pro výpočet účinnosti elektromagnetického stínění vrstvených a anizotropních kompozitů je navržena i v práci [25].

#### 4.2.2 Modely založené na struktuře plošné textilie

Jak bylo zmíněno výše, textilie nejsou kompaktním materiálem. V oblasti vazných bodů vznikají otvory, které účinnost stínění snižují. Při výpočtu efektivitu stínění bariéry s otvory musí být brány v úvahu především rozměry otvorů a také frekvence. S přihlédnutím k těmto faktorům uvádí [7] rovnici (25) pro výpočet účinnosti stínění samotných otvorů.

$$SE_{apt} = 158 - 20 \log (l * f) + 27,3 \frac{t}{l} + 20 \log \left( 1 + \ln \left( \frac{l}{s} \right) \right) \quad (25)$$

kde  $l$  je šířka otvoru [cm] a  $s$  je výška otvoru [cm].

Vyjádření účinnosti stínění samotných otvorů se věnuje i práce [21], kde se autor zabývá samotným modelováním účinnosti stínění textilií. Uvádí rovnici ve tvaru (26).



$$SE_{apt} = 100 - 20\log(L * f) + 20\log\left[1 + \ln\left(\frac{L}{s}\right)\right] + 30\frac{t}{L} \quad (26)$$

kde  $L$  je maximální velikost otvoru [mm],  $s$  je minimální velikost otvoru [mm] a  $t$  je tloušťka plošné textilie [mm].

Velikost otvorů textilie není pravidelná, proto se jako  $L$  uvažuje největší rozměr, zpravidla úhlopříčně, nikoliv nejdelší strana otvoru.

Jiný vzorec pro výpočet efektivity stínění bariéry s otvory uvádí práce [22], kde autor rozlišuje tenké a silné bariéry. Pro tenké bariéry je v práci uveden vztah (27) pro samotný otvor. Rovnice platí v případě, že splňuje podmínku  $d > t$ , tedy průměr otvoru je větší než tloušťka materiálu.

Upravený vztah (28) pak vyjadřuje účinnost stínění více otvorů v tenké bariéře, pro který platí podmínka  $s < \lambda/2$ , kde  $s$  je vzdálenost dvou sousedních otvorů.

$$SE_{apt} = 20\log\left(\frac{\lambda}{2d}\right) \quad (27)$$

$$SE_{apt} = 20\log\left(\frac{\lambda}{2d}\right) - 10\log n \quad (28)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka,  $d$  je průměr otvoru a  $n$  je počet otvorů.

Pro silné stínící materiály, kde platí podmínka  $d \gg t$ , tedy průměr otvoru je mnohonásobně větší než tloušťka bariéry. Autor uvádí rovnici ve tvaru (29).

$$SE_{apt} = 20\log\left(\frac{\lambda}{2d}\right) + 27,3\frac{t}{d} \quad (29)$$

Z jiného úhlu nahlíží na problematiku otvorů v textilií práce [8] a [25]. Pro výpočet stínění elektromagnetického záření otvorů je použit součet absorpčního útlumu, útlumu odrazem a útlumu mnohonásobnými odrazy, ke kterým jsou přičteny korekční členy. Rovnice má tedy tvar (30).

$$SE = A_a + R_a + B_a + K_1 + K_2 + K_3 \quad (30)$$

kde  $A_a$  je absorpční útlum [dB],  $R_a$  je útlum odrazem [dB],  $B_a$  je útlum mnohonásobným odrazem [dB] a  $K_1$ ,  $K_2$  a  $K_3$  jsou korekční členy [dB].

Pro výpočet absorpčního útlumu  $A_a$  je dána rovnice (31).

$$A_a = 27,3\left(\frac{d}{W}\right) \quad (31)$$

kde  $d$  je hloubka otvoru v tkanině [cm] a  $W$  je šířka otvoru v tkanině kolmá k E-poli [cm].

Útlum odrazem  $R_a$  závisí na obou impedancích dopadající vlny a tvaru tkaniny. Je dán vztahem (32).

$$R_a = 20 \log_{10} \left( \frac{1 + 4K^2}{4K} \right) \quad (32)$$

kde  $K = j6,69 \cdot 10^{-5} fW$ ,  $f$  se rozumí frekvence [MHz].

Člen  $B_a$  značí útlum mnohonásobným odrazem. V případě, že absorpční útlum  $A_a$  je menší než 15dB, je pro výpočet  $B_a$  použit vztah (33).

$$B_a = 20 \log_{10} \left\{ 1 - \frac{(K-1)^2}{(K+1)^2} 10^{-A_a/10} \right\} \text{ pro } A_a < 15 \text{ dB} \quad (33)$$

Pro korekční členy  $K_1$ ,  $K_2$  a  $K_3$  jsou dány tvary (34), (35) a (36).

$$K_1 = -10 \log_{10} * a * n \quad (34)$$

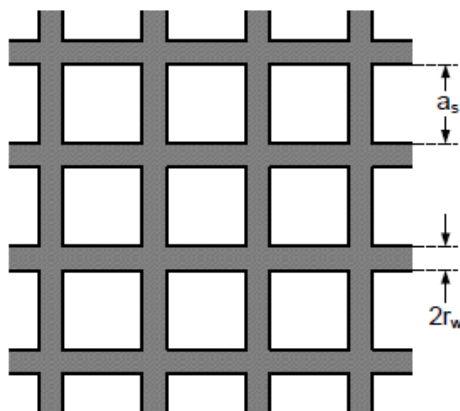
kde  $a$  je plocha [cm<sup>2</sup>] a  $n$  je počet otvorů [otvory/cm<sup>2</sup>].

$$K_2 = -20 \log_{10} (1 + 35p^{-2,3}) \quad (35)$$

kde  $p$  je průměr příze [m]/hloubka vniku elektromagnetického pole do materiálu.

$$K_3 = 20 \log_{10} \left( \coth \left[ \frac{A_a}{8,686} \right] \right) \quad (36)$$

V práci [7] navrhuje autor metodu výpočtu efektivy stínění síťovaných elektromagnetických bariér. Uvažuje, že velikost otvorů v bariéře je malá ve srovnání s vlnovou délkou dopadajícího záření. Materiál, ze kterého je stínící přepážka vyrobena, má kruhový průřez a vzniklé otvory jsou čtvercové, jak ilustruje obrázek 8.



Obrázek 8: Síťovaná elektromagnetická bariéra <sup>[7]</sup>

Při výpočtu celkové účinnosti stínění je v tomto případě třeba brát v úvahu úhel dopadu elektromagnetické vlny s ohledem na směr normály materiálu. V případě, že materiál je dokonale vodivý, je možné definovat zvlášť účinnost stínění pro kolmo polarizované rovinné vlny a zvlášť pro paralelně polarizované rovinné vlny. Nicméně směr polarizace bývá obvykle neznámý. Z toho důvodu je nutné uvažovat účinnost stínění nezávislou na polarizaci.

V té samé práci autor dále navrhuje teoretický model výpočtu účinnosti stínění pro vícevrstvé struktury. Model uvažuje, že všechny vrstvy materiálu jsou izotropní a homogenní [7].

#### 4.2.3 Kombinace modelů

Lineární kombinací modelů založených na elektrických vlastnostech a struktuře plošné textilie lze dosáhnout přesnějšího stanovení účinnosti stínění textilních materiálů.

Kombinaci těchto modelů uvádí [7]. Vychází ze vztahu pro výpočet účinnosti stínění samotných otvorů a účinností stínění kompaktních materiálů. Po provedení matematických úprav je získána rovnice (37).

$$SE_{textile} = e^{0,017L\sqrt{f}} * SE_{sheet} + (1 - e^{0,017L\sqrt{f}}) * SE_{apt} \quad (37)$$

### III. PRAKTICKÁ ČÁST

#### 5 Studované materiály

Pro ověření jednotlivých modelů byla použita data získaná měření 9 vzorků textilií lišících se poměrem polypropylenových vláken TREVON a kovových vláken BEKINOX. Jemnost příze použité pro zhotovení tkaniny byla 51 tex. Obsah kovových vláken 1, 3, 5, 10, 15, 20, 40, 60 a 75%. Tkanina byla vyhotovena ve vazbě keprové 2/2, s dostavou osnovy 20 nití na cm a dostavou útku 19 nití na cm. Specifikaci vzorků uvádí tabulka 3.

Vzorek	Materiálové složení	Plošná hmotnost [g.m <sup>-2</sup> ]	Tloušťka [mm]
1	99% PP/ 1% SS	233,5	0,78
2	97% PP/ 3% SS	225,1	0,745
3	95% PP/ 5% SS	209,02	0,774
4	90% PP/ 10% SS	221,0	0,75
5	85% PP/ 15% SS	217,7	0,73
6	80% PP/ 20% SS	208,8	0,71
7	60% PP/ 40% SS	222,0	0,70
8	40% PP/ 60% SS	216,2	0,63
9	25% PP/ 75% SS	225,3	0,57

*Tabulka 3: Specifikace vzorků*

## 6 Hodnocení elektrických vlastností

Elektrické vlastnosti textilií byly hodnoceny z hlediska jejich objemové a plošné rezistivity dle ČSN 34 1382 [29]. Pro plošnou rezistivitu  $\rho_s$  platí vztah (38).

$$\rho_s = r_s * \frac{o}{l} \quad (38)$$

kde  $\rho_s$  je povrchová rezistivita [ $\Omega$ ],  $r_s$  je povrchový odpor [ $\Omega$ ],  $o$  je délka elektrod [m] a  $l$  je vzdálenost elektrod [m].

Objemová rezistivita  $\rho_v$  se pak řídí vztahem (39).

$$\rho_v = r_v * \frac{S}{h} \quad (39)$$

kde  $\rho_v$  je objemová rezistivita [ $\Omega\text{cm}$ ],  $r_v$  je objemový odpor [ $\Omega$ ],  $S$  je plocha elektrod [ $\text{cm}^2$ ] a  $h$  je tloušťka textilie [cm]. Zjištěné elektrické vlastnosti uvádí tabulka 4.

Vzorek	Materiálové složení	Objemová rezistivita $\rho_v$ [ $\Omega\text{.cm}$ ]	Plošná rezistivita $\rho_s$ [ $\Omega$ ]
1	99% PP/ 1% SS	1,424E+07	3,612E+07
2	97% PP/ 3% SS	7,339E+06	7,815E+06
3	95% PP/ 5% SS	2,840E+05	3,972E+05
4	90% PP/ 10% SS	7,75E+05	3,605E+04
5	85% PP/ 15% SS	3,64E+04	6,905E+03
6	80% PP/ 20% SS	1,79E+04	1,874E+03
7	60% PP/ 40% SS	5,47E+03	1,20E+02
8	40% PP/ 60% SS	1,56E+03	5,00E+01
9	25% PP/ 75% SS	1,51E+03	3,82E+01

Tabulka 4: Elektrické vlastnosti

## 7 Přímé hodnocení elektromagnetického stínění

Princip experimentálního měření efektivity elektromagnetického stínění spočívá v měření dvou charakteristik. Nejprve se měří výkonová hustota bez připevněné textilie. Následně se měří výkonová hustota uvnitř vlnovodu, jenž má vstup překryt zkoušenou textilií.

Z těchto dvou zjištěných hodnot lze určit útlum elektromagnetického pole textilie dle vztahu (40).

$$SE = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (40)$$

kde  $P_1$  je měřená výkonová hustota s textilním materiálem a  $P_2$  je měřená výkonová hustota bez textilního materiálu.

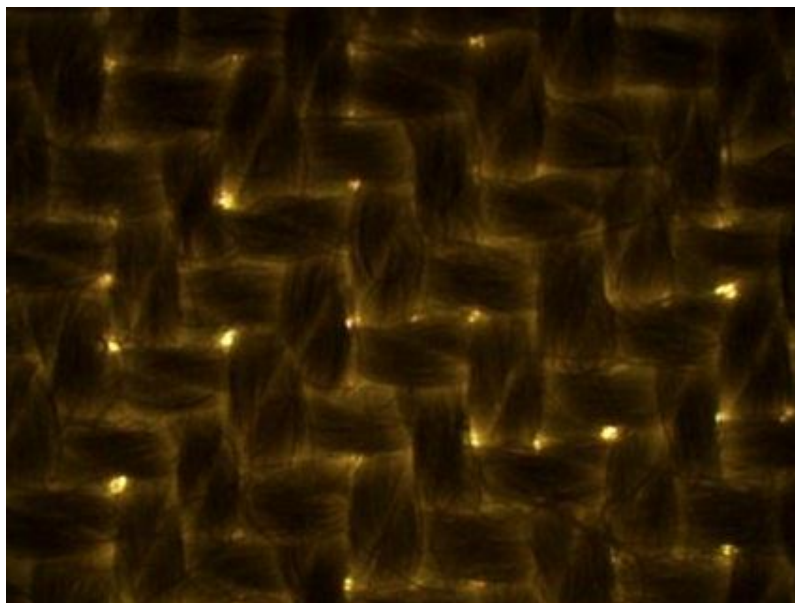
Měření účinnosti elektromagnetického stínění byla provedena při frekvenci 2,45 GHz. Experimentálně zjištěné hodnoty  $SE$  jsou uvedeny v tabulce 5.

Vzorek	Materiálové složení	$SE$ [dB] $f=2,45\text{GHz}$
1	99% PP/ 1% SS	19,26
2	97% PP/ 3% SS	26,69
3	95% PP/ 5% SS	29,16
4	90% PP/ 10% SS	31,83
5	85% PP/ 15% SS	33,54
6	80% PP/ 20% SS	36,02
7	60% PP/ 40% SS	36,10
8	40% PP/ 60% SS	37,55
9	25% PP/ 75% SS	38,3

Tabulka 5: Experimentálně zjištěné hodnoty  $SE$

## 8 Zjišťování porozity tkanin

Veškeré modely pro výpočet účinnosti stínění elektromagnetického záření uvedené v podkapitole 4.2.1 vychází z předpokladu, že stínicí bariéra je kompaktní materiál neobsahující žádné otvory. Textilie se však vyznačují otvory v oblasti vazných bodů, jak je patrné z obrázku 9. Každý z těchto otvorů více či méně snižuje efektivitu stínění. V tomto případě je účinnost stínění závislá především na délce a šířce otvoru a také na frekvenci.



*Obrázek 9: Otvory v oblasti vazných bodů*

Podkapitola 4.2.2 se zabývá modely pro výpočet účinnosti stínění samotných otvorů v textilií. Pro ověření uvedených modelů je třeba nejprve zjistit průměrné geometrické rozměry otvorů, jejich průměrný počet, velikost nejmenšího a největšího otvoru a průměrnou plochu otvorů. Tyto hodnoty potřebné pro další výpočty byly stanoveny pomocí obrazové analýzy.

### 8.1 Obrazová analýza

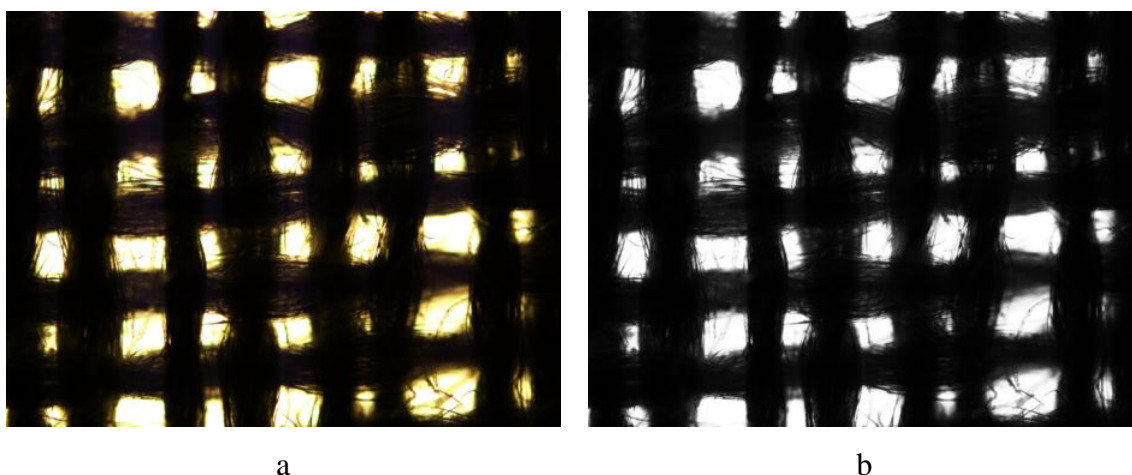
Obrazovou analýzou v programu MATLAB je možné získat velké množství různých charakteristik objektu z předem pořízeného a zpracovaného snímku. V tomto případě se jednalo o zjištění geometrických rozměrů otvorů v oblasti mezi vaznými body textilie, průměrný počet otvorů, velikosti nejmenšího a největšího otvoru a průměrné plochy otvorů.

Nejprve byly, pomocí mikroskopu, pořízeny snímky zkoumaných textilií. Se zvyšujícím se obsahem vodivých vláken se průměr příze snižuje. Při zachování

totožné dostavy osnovy i útku se tkanina stává poréznější a studované otvory v oblasti vazných bodů mají větší rozměry. Pro textilie s obsahem kovových vláken 75, 60, 40, 20 a 15% byly pořízeny 5x zvětšené snímky o rozlišení 1360x1024. Pro materiály s obsahem vodivé složky 10% a méně byly snímky se stejným rozlišením pořízeny 1,25x zvětšené, protože materiály s tímto obsahem vodivé složky nemají příliš výrazné otvory. Mikroskop v tomto případě při větším zvětšení snímá spíše strukturu, což není pro další vyhodnocení žádoucí.

### 8.1.1 Proces zpracování obrazu

Prvním krokem je snímání obrazu, jeho digitalizace a uložení. Následuje předzpracování obrazu, jehož cílem je úprava jasu a kontrastu, případné zostření, ořez či úprava velikosti. Jelikož snímek pořízený mikroskopem je barevný, jako další krok následuje převedení barevného obrazu pomocí funkce `rgb2gray` na obraz šedo-  
tónový. Obrázek 10 ukazuje první krok obrazové analýzy. Na snímku je textilie s obsahem vodivých vláken 75%.



Obrázek 10: a) původní snímek pořízený mikroskopem; b) šedo tónový obraz

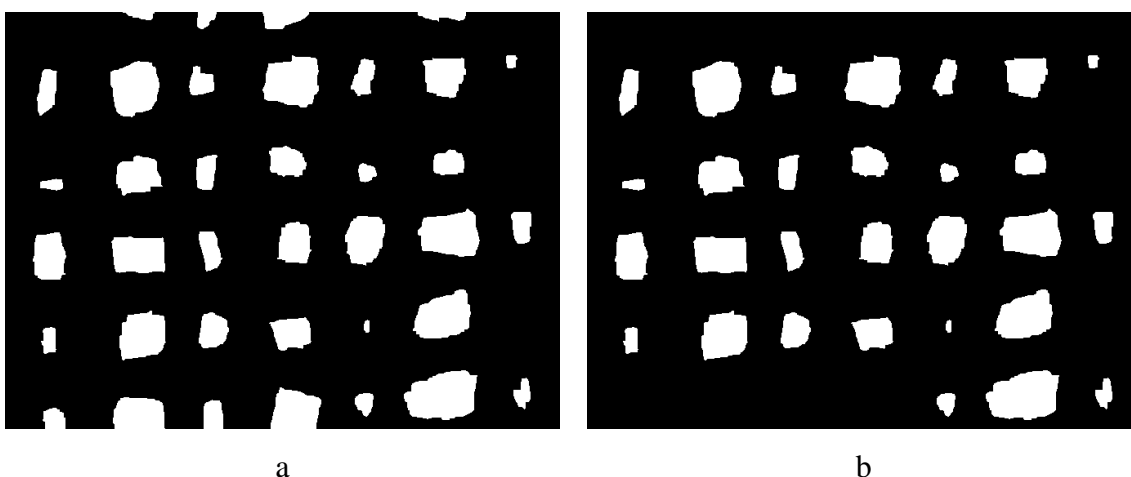
Následuje prahování (segmentace obrazu), během kterého se šedo-tónový obraz převádí na binární příkazem `im2bw`. V dalším kroku je nutné provést morfologické transformace, kterými se z binárního obrazu odstraní nepřesnosti a šum, které by při vyhodnocení způsobily chyby. V tomto případě byl prvním použitým příkazem `bwareaopen`. Tímto příkazem se z obrazu odstraní objekty menší, než jsou studované póry. U různých textilií se požadovaná velikost liší, protože jak již bylo zmíněno výše, velikost otvorů mezi vaznými body závisí na velikosti obsahu vodivé složky, není proto pro všechny textilie stejná. Tyto dva kroky zobrazuje obrázek 11.





Obrázek 11: a) binární obraz; b) odstranění příliš malých objektů

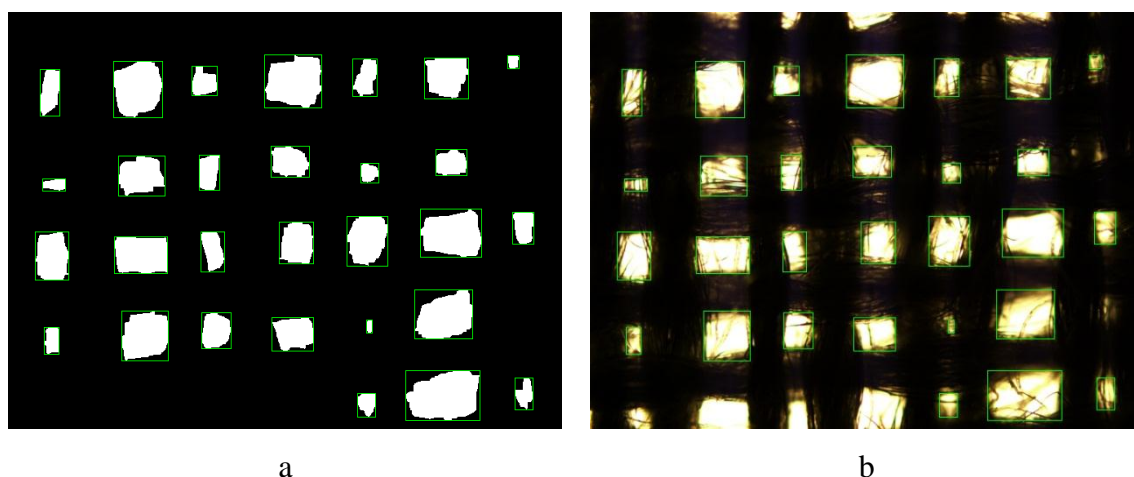
Následuje operace nazývaná uzavření příkazem `imclose`, jedná se o dilataci následovanou erozí se stejným strukturním prvkem. Cílem operace je zaplnění děr nebo spojení blízkých objektů. Takové chyby může způsobit například vlákno zasahující na snímku do otvoru mezi vaznými body. Posledním příkazem je `imclearborder`, který z obrazu odstraní otvory z okrajových oblastí. Přesnou velikost otvorů v okrajích není možné zjistit a při vyhodnocení by způsobily chyby. Z takto připraveného obrazu je možné získat popis nalezených objektů (pórů) pomocí souboru číselných charakteristik, statisticky vyhodnotit a následně využít pro matematické výpočty efektivity stínění. Obrazy po obou výše uvedených příkazech ilustruje obrázek 12.



Obrázek 12: a) spojení blízkých objektů; b) odstranění objektů v okrajových oblastech

Po morfologických transformacích následuje vlastní popis vlastností jednotlivých objektů na obraze. K popisu oblastí slouží příkaz `regionprops(L,properties)`, kde `L` je počet popisovaných objektů a `properties` je seznam zjišťovaných vlastností oddělených čárkami. V tomto případě se jedná o vlastnosti `Area` a `BoundingBox`. `Area` udává přesný počet pixelů v popisované oblasti a `BoundingBox` zjišťuje rozměry nejmenšího obdélníku obsahujícího popisovanou oblast.

Tento nejmenší obdélník obsahující oblast může být zakreslen do obrazu příkazem `rectangle`. Obrázek 13 ilustruje zakreslení nejmenších obdélníků obsahující otvory v oblasti mezi vaznými body jak na binárním obraze, tak i na původním snímku pořízeném mikroskopem.



Obrázek 13: a) zakreslení na binárním obraze; b) zakreslení na původním snímku

Posledním krokem je statistické vyhodnocení, při kterém je třeba zjistit průměrné geometrické rozměry otvorů mezi vaznými body. Příkazem `mean` se zjistí průměrná šířka a výška otvorů, jejich počet i plocha. Příkazy `min` a `max` slouží k zjištění nejmenších a největších rozměrů otvorů. Všechny rozměry jsou v pixelech. Pro další výpočty je nutné převést informaci v jednotce pixel na mikrometry. Snímky pořízené při zvětšení 5x mají rozlišení 1360x1024 pixelů, které odpovídá rozměru 2889x2175  $\mu\text{m}$ . To znamená, že 1px ve skutečnosti odpovídá 2,142  $\mu\text{m}$ . Při rozlišení 1,25x odpovídá rozlišení 1360x1024 pixelů rozměru 14021x10557  $\mu\text{m}$ , v tomto případě 1px odpovídá 10,31  $\mu\text{m}$ . Kompletní skript obrazové analýzy textilie s obsahem vodivé komponenty 75% je v příloze 1.

Pro materiály s obsahem kovových vláken 75, 60, 40, 20 a 15% bylo pořízeno 10 snímků každého při zvětšení 5x. Pro materiály s obsahem vodivé složky 10% a méně

bylo pořízeno 5 snímků každého při zvětšení 1,25x. Pro pořízené snímky byla provedena výše popsaná obrazová analýza.

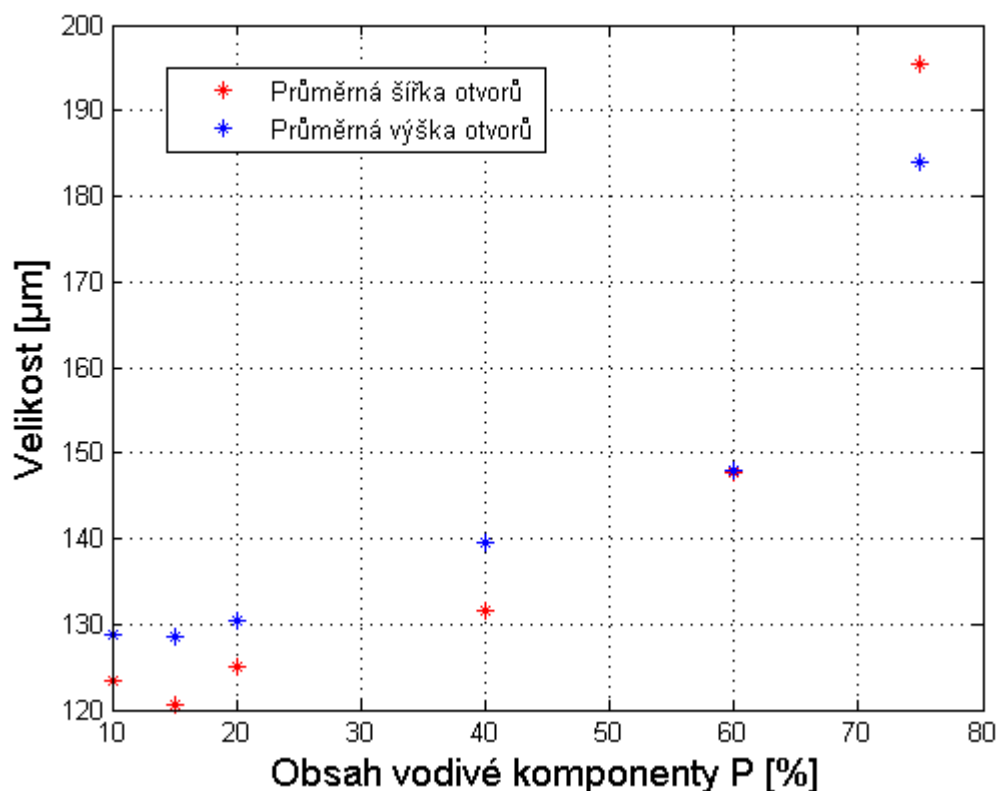
### 8.1.2 Výsledky obrazové analýzy

Tabulky 6 a 7 uvádí průměrné hodnoty vybraných charakteristik objektů (pórů) získaných obrazovou analýzou. Textilie s obsahem vodivé složky 1, 3 a 5% byly z hodnocení vyloučeny kvůli příliš nízkému počtu a zanedbatelné velikosti pórů vzhledem ke studovanému parametru elektromagnetického stínění.

Vzorek	Materiálové složení	Porozita [%]	Šířka $l$ [ $\mu\text{m}$ ]	Výška $s$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	99% PP/ 1% SS	---	---	---
2	97% PP/ 3% SS	---	---	---
3	95% PP/ 5% SS	---	---	---
4	90% PP/ 10% SS	0,2533	123,2813	128,7653
5	85% PP/ 15% SS	3,2303	120,6500	128,4500
6	80% PP/ 20% SS	3,5853	124,9297	130,4000
7	60% PP/ 40% SS	4,0120	131,4850	139,4371
8	40% PP/ 60% SS	8,0687	147,7536	147,9242
9	25% PP/ 75% SS	10,3372	195,4793	184,0901

*Tabulka 6: Výsledky obrazové analýzy I*

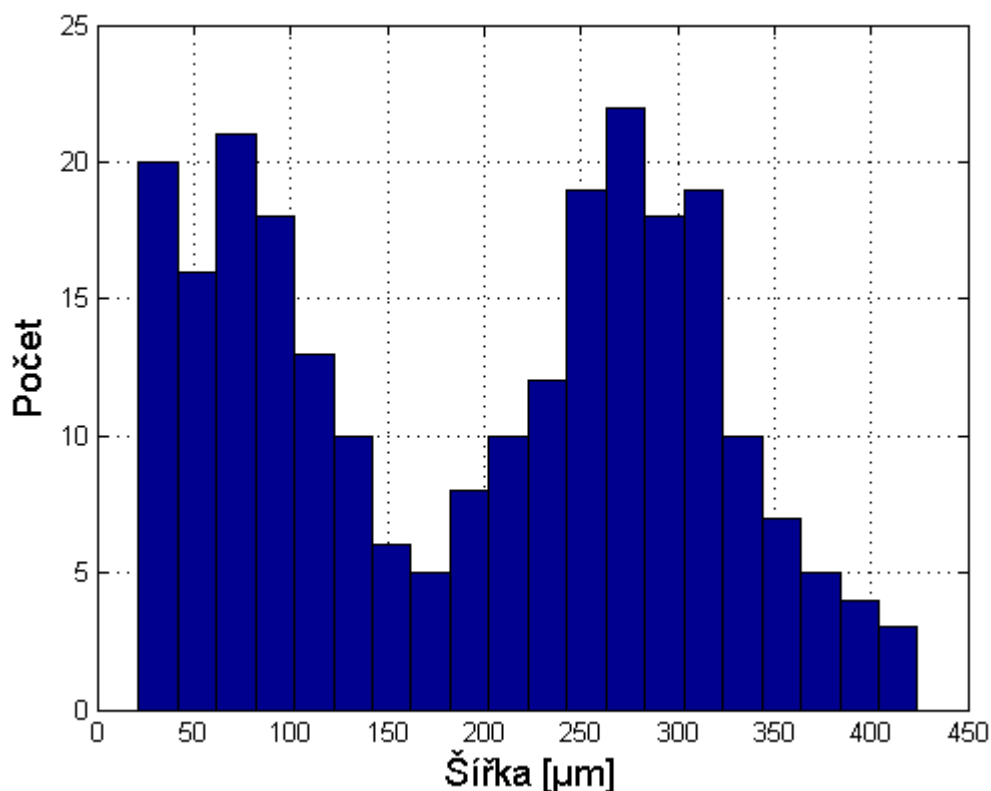
V tabulce 6 je uvedena porozita materiálů, která je definována jako procento otvorů z celkové plochy textilie, tedy prostor ve struktuře, který není zaplněný přízí. Z uvedených výsledků je zřejmé, že porozita se s vyšším obsahem kovové složky v materiálu se dle očekávání zvyšuje, jak dokazuje graf na obrázku 14.



Obrázek 14: Závislost průměrné šířky a výšky otvorů na obsahu vodivé komponenty

Materiály s obsahem vodivých vláken 75, 60 a 40% jsou poréznější a otvory mezi vaznými body mají jasně viditelné. Textilie s nižším obsahem vodivé komponenty, tedy 20% a méně, mají kompaktnější strukturu. Tento jev způsobuje fakt, že čím více příze obsahuje kovových vláken, tím má menší průměr a póry se tedy ve tkaninách s větším obsahem vodivé komponenty zvětšují (dostava je konstantní pro veškeré druhy vzorků). Z grafu je dále patrné, že otvory mezi vaznými body mají větší průměrnou výšku než šířku. Tato skutečnost se mění až u materiálu s obsahem vodivé komponenty 60%. V případě této textilie se průměrná výška a šířka téměř neliší. V případě poslední textilie s obsahem 75% naopak průměrná šířka převyšuje průměrnou výšku otvorů mezi vaznými body.

Dále tabulka uvádí průměrné hodnoty šířky  $l$  a výšky  $s$  otvorů v oblasti vazných bodů. Z výsledků je patrné, že se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty se zvětšují i geometrické rozměry otvorů a to jak jejich šířka, tak i výška. Na výsledné hodnoty má vliv především vazba tkaniny. Histogram na obrázku 15 ilustruje rozdělení velikostí šířky pórů pro textilii s obsahem vodivé komponenty 75%. Na histogramu jsou patrné dva vrcholy, které značí větší počet malých a větší počet velkých pórů ve tkanině, což je pro keprovou vazbu charakteristické.



Obrázek 15: Histogram rozdělení šířky u textilie s obsahem vodivé složky 75%

Vzorek	Materiálové složení	Max. velikost otvoru $L$ [μm]	Min. velikost otvoru $s$ [μm]	Plocha $a$ [μm <sup>2</sup> ]	Průměrný počet otvorů $n$ [počet/cm <sup>2</sup> ]
1	99% PP/ 1% SS	---	---	---	---
2	97% PP/ 3% SS	---	---	---	---
3	95% PP/ 5% SS	---	---	---	---
4	90% PP/ 10% SS	480,9369	30,9300	13885,5871	117,4872
5	85% PP/ 15% SS	339,5526	29,9880	12104,0355	270,5466
6	80% PP/ 20% SS	532,4281	25,7040	12727,1081	286,4611
7	60% PP/ 40% SS	354,4735	36,4140	16021,8687	254,6521
8	40% PP/ 60% SS	398,4178	25,7040	20623,4207	397,8627
9	25% PP/ 75% SS	534,6768	21,4200	31453,2407	334,2047

Tabulka 7: Výsledky obrazové analýzy 2

Tabulka 7 uvádí další charakteristiky získané obrazovou analýzou. Jsou to maximální a minimální rozměry otvorů, průměrná plocha otvorů a jejich průměrný počet na cm<sup>2</sup>.

## 9 Aplikace modelů založených na elektrických vlastnostech textilií

Dosažením vstupních parametrů jako je na např. objemová rezistivita, frekvence, tloušťka vzorku a další do vzorců pro výpočet efektivity elektromagnetického stínění uvedených v podkapitole 4.2.1 bylo ověřeno všech 9 matematických modelů. Pro každý model byla vykreslena závislost účinnosti stínění  $SE$  [dB] na obsahu vodivé komponenty  $P$  [%], která byla porovnána s experimentálně zjištěnými hodnotami. Dále byla vykreslena závislost  $SE$  [dB] na frekvenci [MHz]. Pro veškeré výpočty a následné grafické zobrazení byly vytvořeny skripty v prostředí software MATLAB.

Účinnost stínění byla predikována pro frekvenci 2,45 GHz, aby mohla být porovnatelná s experimentálně zjištěnými hodnotami. Jak bylo předpokládáno, žádný z matematických modelů neodpovídá přesně experimentálně zjištěným datům. Jako příklad je v příloze 2 uveden skript pro výpočet efektivity stínění elektromagnetického záření podle modelu (15). Skripty pro výpočty následujících modelů jsou oproti tomuto skriptu jen mírně pozměněny.

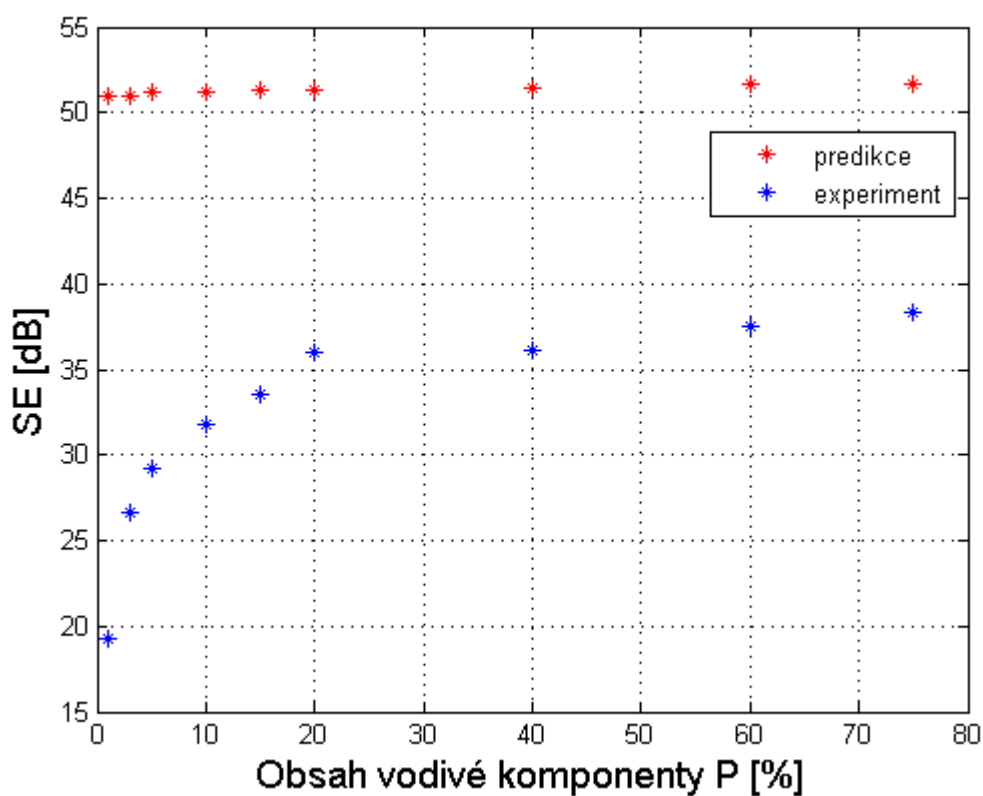
### Model (15)

Matematický model (15) pro výpočet efektivity stínění elektromagnetického záření vychází při výpočtu z objemové rezistivity a tloušťky materiálu, zároveň je závislý na frekvenci.

Model predikuje ve výsledku celkově vyšší účinnost stínění, než jaká ve skutečnosti je. Vypočtené hodnoty  $SE$  [dB] pro jednotlivé textilie s obsahem vodivé komponenty  $P$  [%] jsou uvedeny v tabulce 8. Graf na obrázku 16 ilustruje porovnání závislosti vypočtených hodnot a s hodnotami experimentálně zjištěnými a graf na obrázku 17 pak závislost účinnosti stínění pro jednotlivé textilie v závislosti na frekvenci.

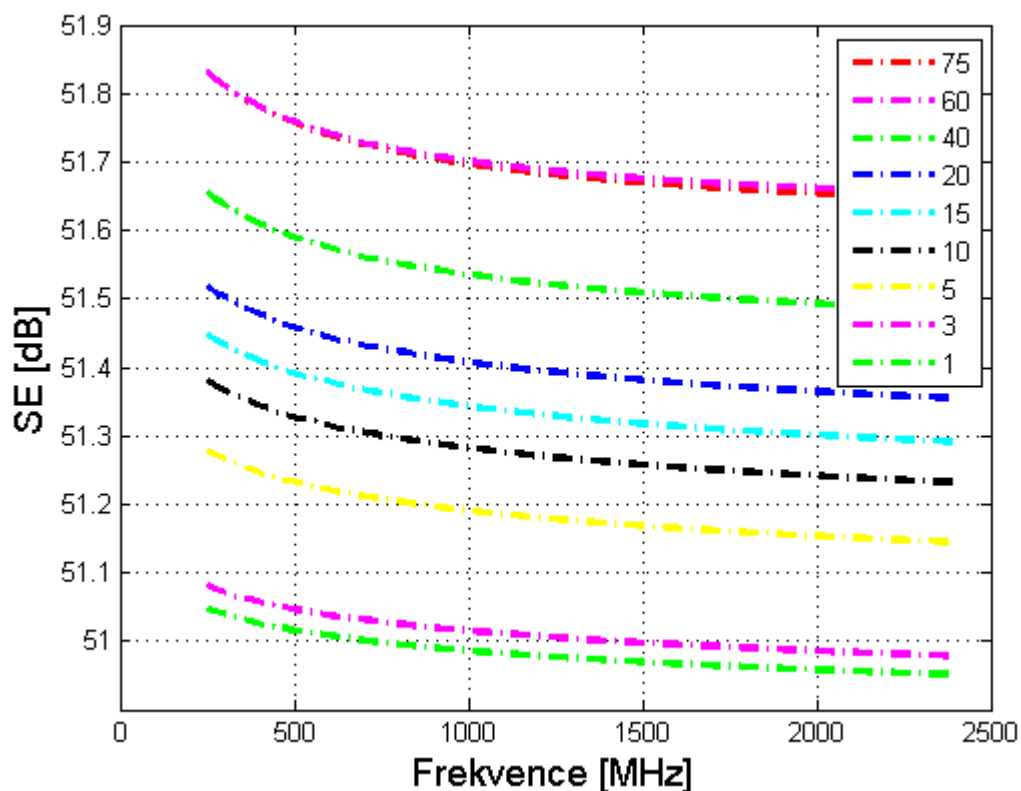
$P$ [%]	$SE$ [dB]	$SE_{\text{experiment}}$ [dB] $f=2,45\text{GHz}$
1%	50,9512	19,26
3%	50,9785	26,69
5%	51,1444	29,16
10%	51,2319	31,83
15%	51,2913	33,54
20%	51,3548	36,02
40%	51,4841	36,10
60%	51,6551	37,55
75%	51,6465	38,3

Tabulka 8: Hodnoty  $SE$  vypočtené podle modelu (15)



Obrázek 16: Porovnání závislostí (model (15))

Graf na obrázku 16 ukazuje, že model (15) předpokládá nárůst účinnosti stínění se zvyšováním podílu vodivé složky v textilií pouze minimální. Celkově však predikuje účinnost stínění elektromagnetického záření vyšší než je skutečně zjištěná.



Obrázek 17: Průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie podle modelu (15)

Graf na obrázku 17 ukazuje závislost účinnosti elektromagnetického stínění veškerých studovaných vzorků na frekvenci. Jak se dalo předpokládat, se zvyšující se frekvencí efektivita stínění klesá. Nejnižší účinnost stínění elektromagnetického záření vykazuje textilie s nejnižším obsahem vodivých vláken, tedy ve složení 99% PP/1% SS. Zvýšení obsahu vodivé komponenty znamená zvýšení účinnosti stínění. Nejvyšší efektivita tak podle předpokladu dosahují textilie s obsahem vodivé složky 60 a 75%.

### Model (16)

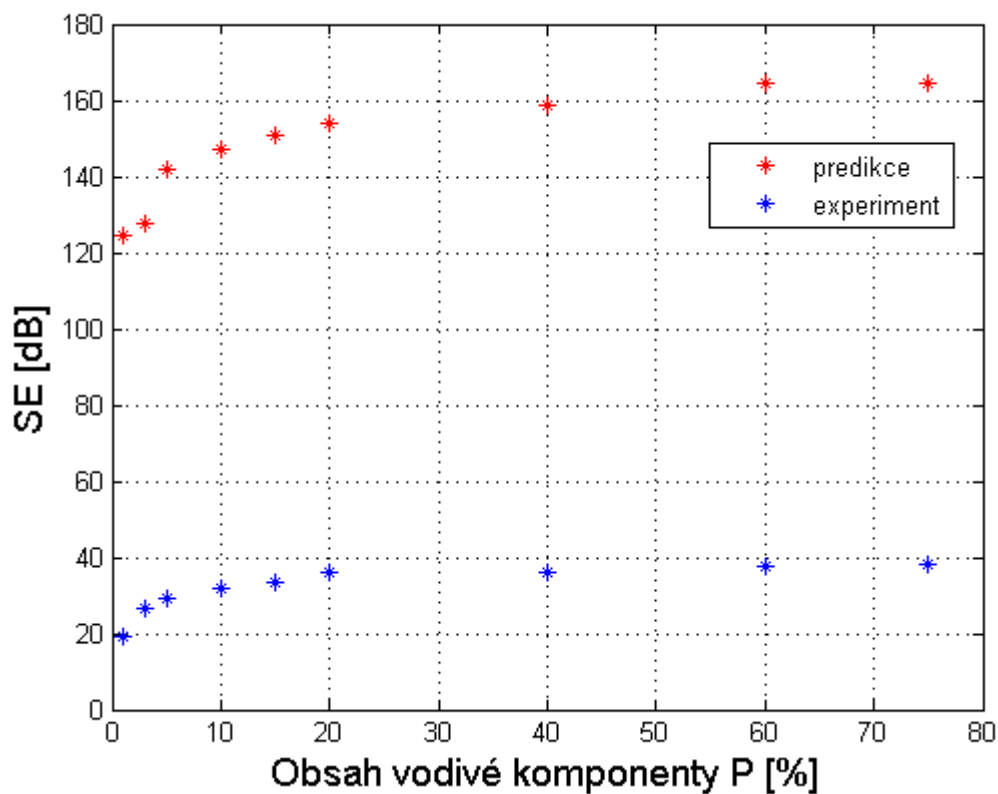
Druhý ověřovaný model, model (16), ve výpočtu využívá relativní permeabilitu, konduktivitu i tloušťku materiálu. Stejně jako předchozí model je závislý na frekvenci. Hodnota permeability volného prostředí  $\mu_0$  je konstanta, má hodnotu  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$ .

Model (16) také předpokládá vyšší účinnost stínění, než jakou materiál vykazuje ve skutečnosti. Na rozdíl od předchozího modelu je rozsah vyšší, pohybuje se v rozmezí od 124,68 do 164,43 dB. Všechny vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 9 a graficky znázorněny na obrázku 18, průběh efektivita stínění pak ilustruje obrázek 19.



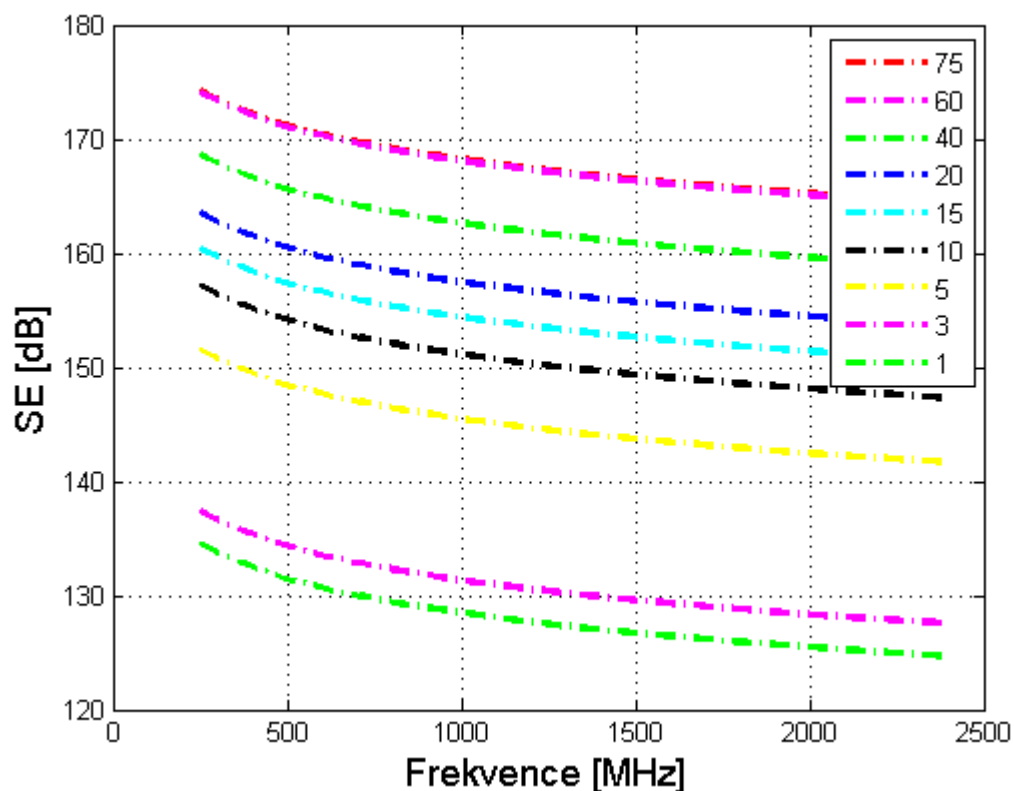
$P$ [%]	$SE$ [dB]	$SE_{experiment}$ [dB] $f=2,45\text{GHz}$
1%	124,6888	19,26
3%	127,5676	26,69
5%	141,6907	29,16
10%	147,3315	31,83
15%	150,6105	33,54
20%	153,6978	36,02
40%	158,8442	36,10
60%	164,2927	37,55
75%	164,4341	38,3

Tabulka 9: Hodnoty  $SE$  vypočtené podle modelu (16)



Obrázek 18: Porovnání závislosti (model (16))

Dle očekávání model (16) předpovídá se stoupajícím obsahem vodivé komponenty stoupající tendenci účinnosti stínění. Stejně jako předchozí model i model (16) predikuje účinnost stínění mnohonásobně vyšší než je skutečná experimentálně zjištěná.



Obrázek 19: Průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie podle modelu (16)

Graf průběhu účinnosti stínění jednotlivých textilií znázorněný na obrázku 19 opět dokazuje, že čím vyšší je frekvence elektromagnetického záření, tím horší je účinnost jeho stínění. Opět byl potvrzen předpoklad, že čím vyšší bude obsah vodivé komponenty a tedy bude dosaženo vyšší vodivosti, tím bude vyšší stínicí účinnost.

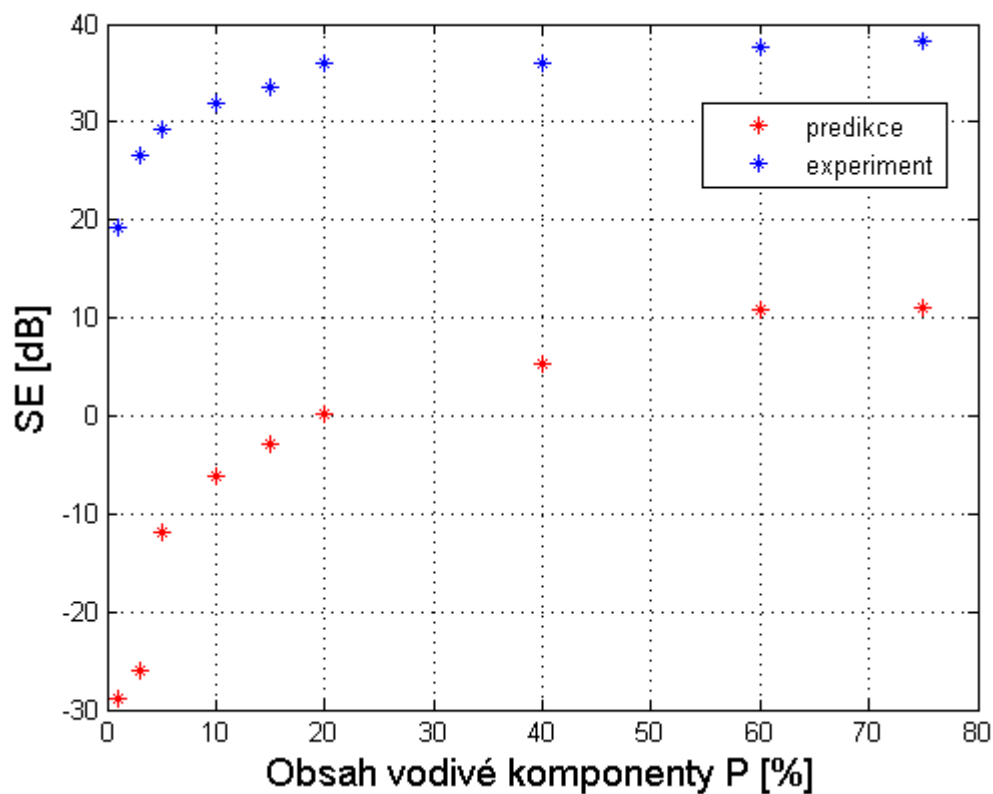
### Model (17)

Model (17) vychází při výpočtu stejně jako předchozí model z relativní permeability, konduktivity, tloušťky materiálu a stejně jako předchozí modely, i tento je závislý na frekvenci.

Hodnoty účinnosti stínění predikované modelem (17) uvádí tabulka 10. Grafy na obrázcích 20 a 21 pak opět porovnání závislostí naměřené a predikované účinnosti stínění a průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie závislý na frekvenci.

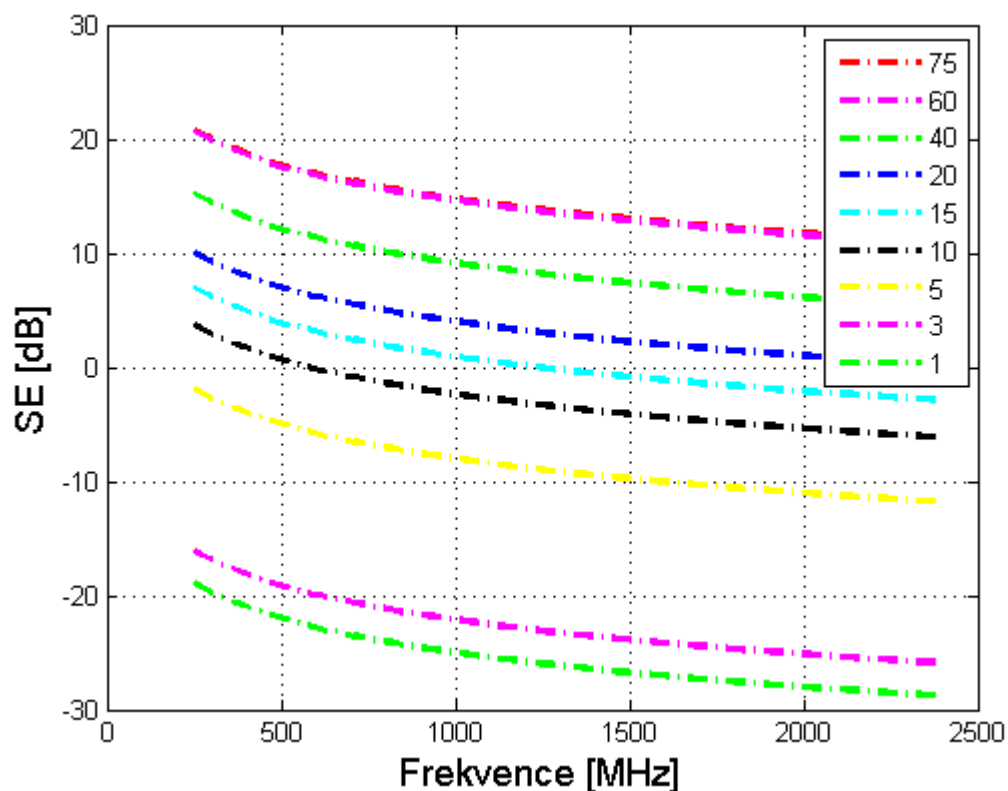
$P$ [%]	$SE$ [dB]	$SE_{experiment}$ [dB] $f=2,45GHz$
1%	-28,7869	19,26
3%	-25,9081	26,69
5%	-11,7846	29,16
10%	-6,1434	31,83
15%	-2,8641	33,54
20%	0,2237	36,02
40%	5,3712	36,10
60%	10,8215	37,55
75%	10,9624	38,3

Tabulka 10: Hodnoty  $SE$  vypočtené podle modelu (17)



Obrázek 20: Porovnání závislostí (model (17))

Z grafu na obrázku 20 je zřejmé, že závislost hodnot vypočtených tímto modelem má obdobný průběh jako závislost experimentálně zjištěných hodnot. Pro materiály s obsahem vodivé komponenty nižším než 20% však předpovídá tento model zápornou účinnost stínění.



Obrázek 21: Průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie podle modelu (17)

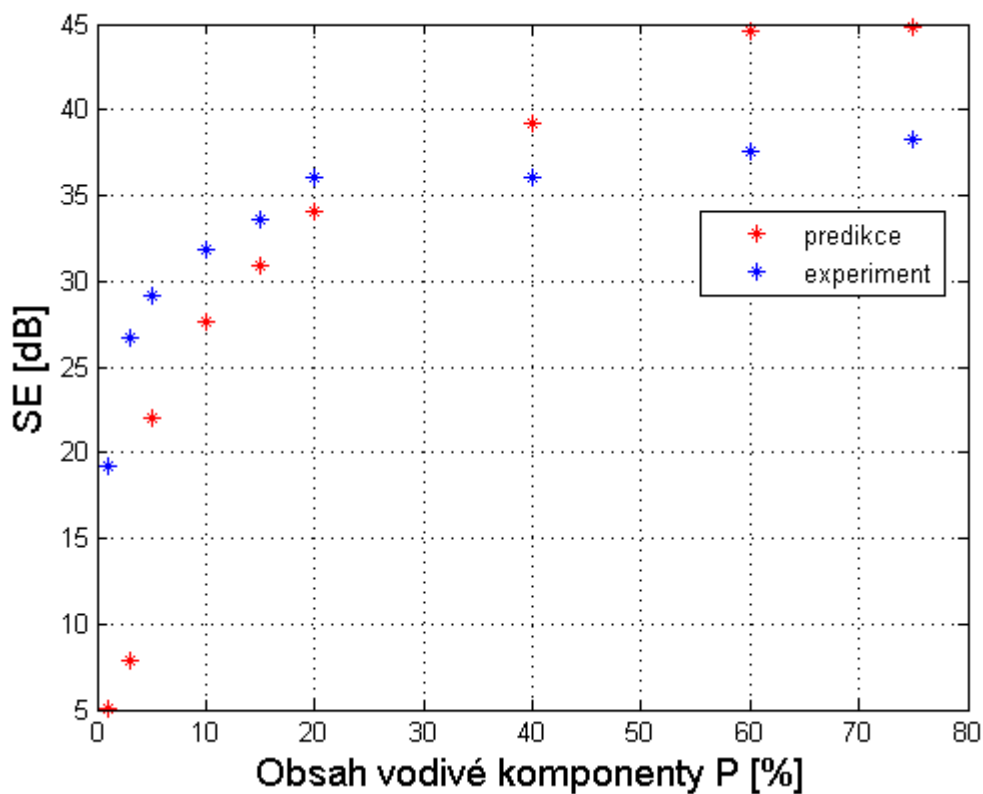
Obrázek 21 ilustruje graf průběhu účinnosti stínění pro jednotlivé textilie v závislosti na frekvenci. Stejně jako předchozí dva modely, i tento předpovídá nejnižší účinnost stínění u textilií s nejnižším obsahem vodivé komponenty. Z průběhů účinnosti stínění je patrné, že se zvyšující se frekvencí elektromagnetického záření účinnost stínění textilie klesá.

### Model (19)

Matematický model (19) využívá ve výpočtu vodivost mědi. Vypočtené hodnoty  $SE$  [dB] pro jednotlivé textilie s obsahem vodivé komponenty  $P$  [%] jsou uvedeny v tabulce 11. Porovnání závislosti modelu se závislostí experimentálně zjištěných hodnot ukazuje graf na obrázku 22. V grafu na obrázku 23 jsou opět zaznamenány předpokládané průběhy účinnosti elektromagnetického stínění pro jednotlivé textilie v závislosti na frekvenci.

$P$ [%]	$SE$ [dB]	$SE_{experiment}$ [dB] $f=2,45GHz$
1%	5,0317	19,26
3%	7,9104	26,69
5%	22,0336	29,16
10%	27,6744	31,83
15%	30,9534	33,54
20%	34,0407	36,02
40%	39,1870	36,10
60%	44,6357	37,55
75%	44,7771	38,3

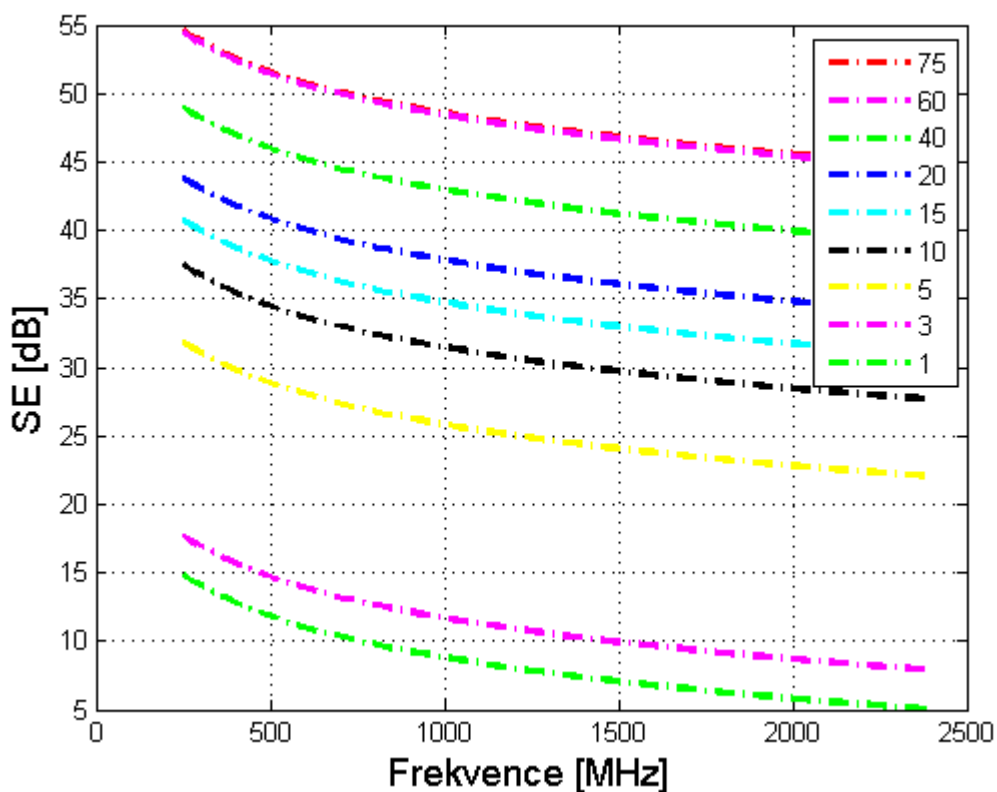
Tabulka 11: Hodnoty  $SE$  vypočtené podle modelu (19)



Obrázek 22: Porovnání závislosti (model (19))

Z grafu na obrázku 22 je patrné, že model (19) odhaduje pro materiály s nižším obsahem vodivé komponenty nižší účinnost stínění než je ve skutečnosti naměřena experimentálně. Pro materiál s obsahem vodivé komponenty 40% a vyšším naopak předpovídá účinnost stínění vyšší, než byla zjištěna měřením. Křivka vykazuje

stoupající tendenci, tedy značí, že se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty je textilie účinnější při stínění elektromagnetického pole.



Obrázek 23: Průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie podle modelu (19)

Graf na obrázku 23 zaznamenává průběhy účinnosti elektromagnetického stínění pro jednotlivé textilie v závislosti na frekvenci. Pro materiály s nízkým obsahem vodivé složky je podle předpokladu efektivita stínění nižší. Se stoupajícím obsahem vodivých vláken v textilií stoupá i efektivita stínění. Závislosti pro materiály s obsahem vodivých vláken 60 a 75% se překrývají, dá se tedy předpokládat, že pro materiály s vyšším obsahem vodivé složky bude podle modelu (19) stoupat účinnost stínění elektromagnetického záření jen minimálně.

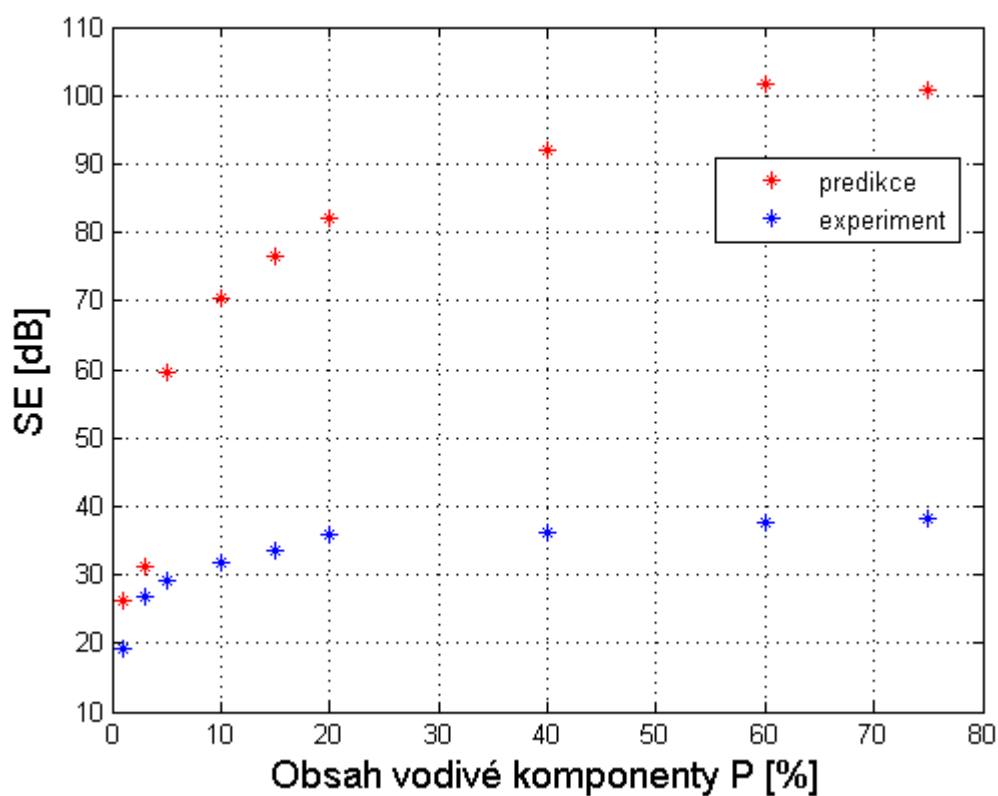
## Model (20)

Matematický model (20) je dalším z řady modelů závislých na frekvenci a využívající při výpočtu účinnosti stínění relativní permeabilitu, konduktivitu a tloušťku materiálu. Předpokládané hodnoty účinnosti stínění uvádí tabulka 12. Porovnání závislostí predikovaných hodnot a experimentálně zjištěných hodnot

účinnosti stínění ukazuje graf na obrázku 24. Průběh účinnosti stínění jednotlivých textilií pak obrázek 25.

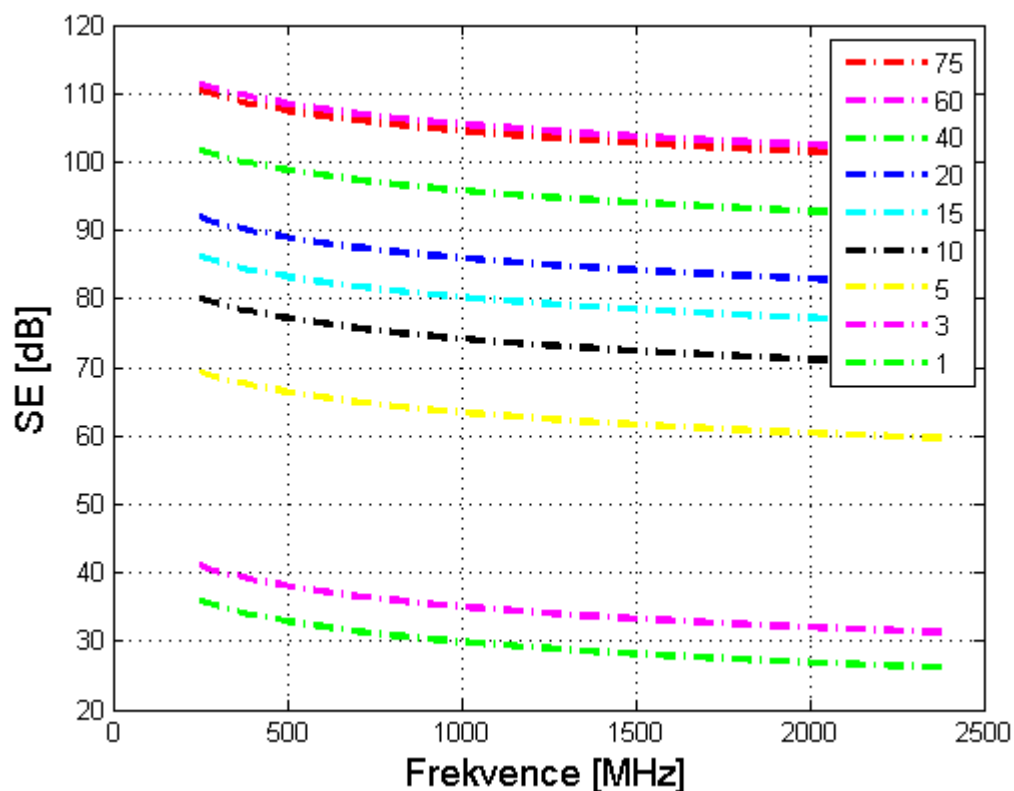
$P$ [%]	$SE$ [dB]	$SE_{\text{experiment}}$ [dB] $f=2,45\text{GHz}$
1%	26,1078	19,26
3%	31,2494	26,69
5%	59,5991	29,16
10%	70,3662	31,83
15%	76,4343	33,54
20%	82,1457	36,02
40%	92,0095	36,10
60%	101,7081	37,55
75%	100,7014	38,3

Tabulka 12: Hodnoty  $SE$  vypočtené podle modelu (20)



Obrázek 24: Porovnání závislostí (model (20))

Z grafu na obrázku 24 jasně vyplývá, že model (20) předpokládá vyšší nárůst účinnosti stínění v závislosti na obsahu vodivé komponenty než ve skutečnosti je.



Obrázek 25: Průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie podle modelu (20)

Obrázek 25 ukazuje, že model (20) také správně predikuje klesající efektivitu stínění se zvyšující se frekvencí. Nejnižší účinnost předpokládá u materiálů s nejnižším obsahem vodivých vláken. Však pro materiál s obsahem vodivé komponenty 60% předpokládá účinnost stínění nepatrně vyšší v porovnání s materiálem o obsahu vodivé složky 75%.

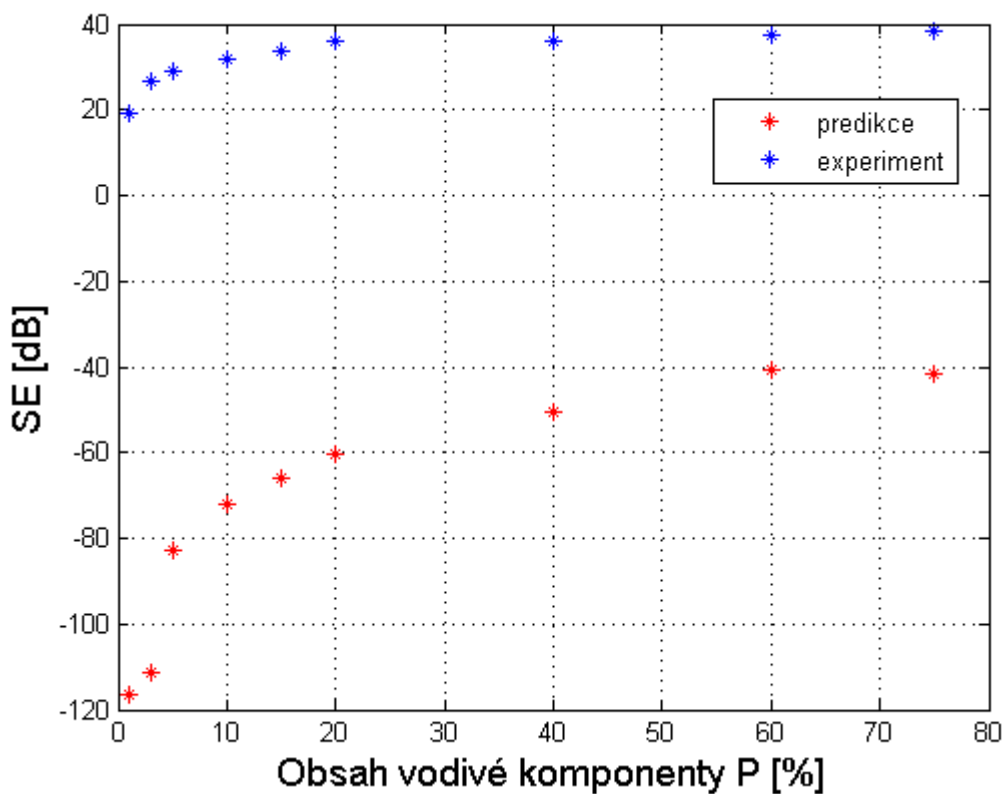
### Model (21)

Obdobou předchozího modelu je model (21). Opět je závislý na frekvenci a využívá při výpočtu účinnosti stínění relativní permeabilitu, konduktivitu a tloušťku materiálu. Vypočtené hodnoty však vychází v záporných číslech, uvádí je tabulka 13. Graf na obrázku 26 opět porovnává obě závislosti účinnosti stínění a graf na obrázku 27 průběh efektivitu stínění jednotlivých textilií podle obsahu vodivé komponenty v závislosti na frekvenci.



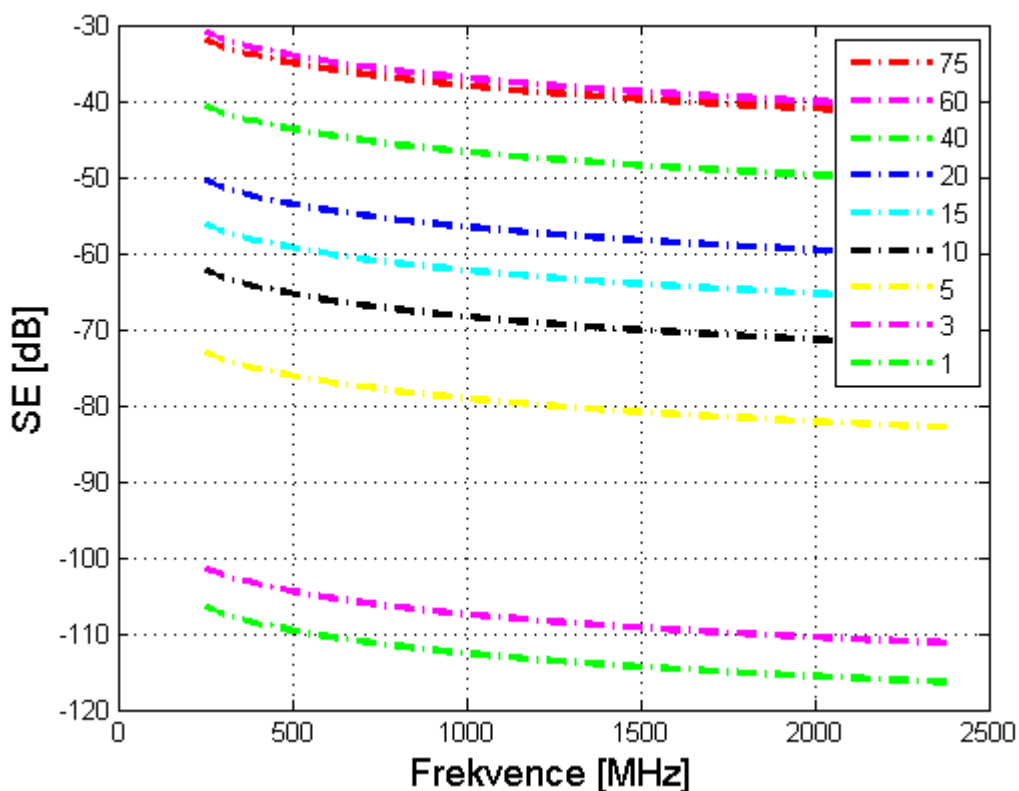
$P$ [%]	$SE$ [dB]	$SE_{experiment}$ [dB] $f=2,45\text{GHz}$
1%	-116,3947	19,26
3%	-111,2531	26,69
5%	-82,9035	29,16
10%	-72,1366	31,83
15%	-66,0687	33,54
20%	-60,3577	36,02
40%	-50,4947	36,10
60%	-40,7977	37,55
75%	-41,8042	38,3

Tabulka 13: Hodnoty  $SE$  vypočtené podle modelu (21)



Obrázek 26: Porovnání závislosti (model (21))

Jak již bylo výše zmíněno, model (21) předpokládá hodnoty účinnosti stínění záporné, proto se závislost predikce nachází pod hodnotami experimentálně zjištěných dat. Dle tvaru závislosti je však patrný podobný průběh efektivity stínění.



Obrázek 27: Průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie podle modelu (21)

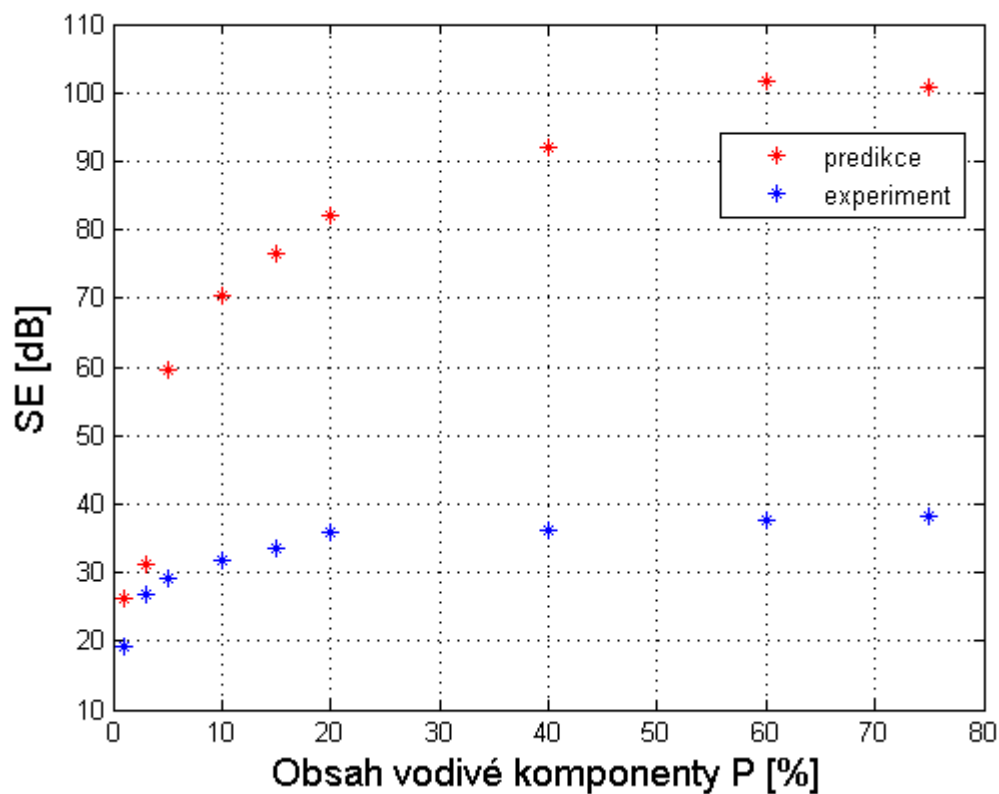
Průběhy účinnosti stínění pro jednotlivé textilie jsou obdobné jako u předchozích modelů. Hodnoty se ovšem pohybují v záporných číslech. Model (21) stejně jako předchozí model predikuje nepatrně vyšší účinnost stínění pro textilií s obsahem vodivé komponenty 60% než pro textilií s obsahem vodivé složky 75%.

### Model (22)

Dalším matematickým modelem, který sčítá odrazovou složku, absorpční složku a složku mnohonásobných odrazů je model (22). Výsledné hodnoty efektivity stínění uvádí tabulka 14. Grafy na obrázcích 28 a 29 pak opět ilustrují závislosti predikovaných hodnot a experimentálně zjištěných hodnot a průběhy účinnosti stínění jednotlivých textilií v závislosti na frekvenci.

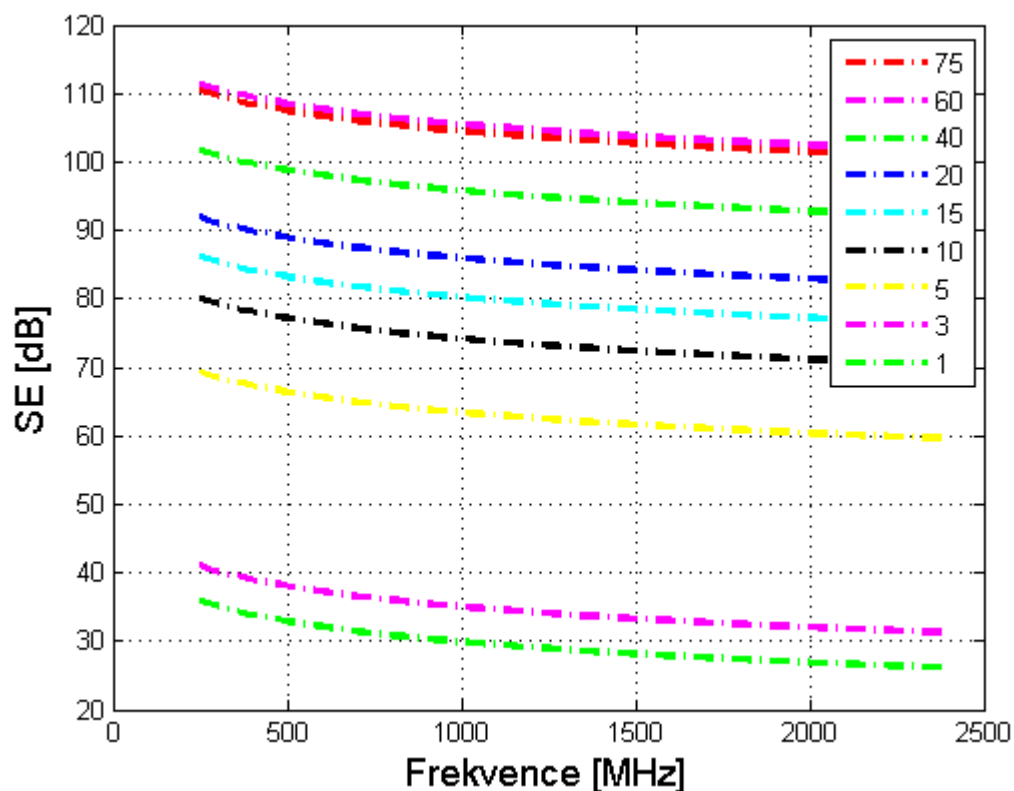
$P$ [%]	$SE$ [dB]	$SE_{experiment}$ [dB] $f=2,45\text{GHz}$
1%	26,1076	19,26
3%	31,2492	26,69
5%	59,5981	29,16
10%	70,3644	31,83
15%	76,4316	33,54
20%	82,1419	36,02
40%	92,0029	36,10
60%	101,6969	37,55
75%	100,6912	38,3

Tabulka 14: Hodnoty  $SE$  vypočtené podle modelu (22)



Obrázek 28: Porovnání závislosti (model (22))

Z grafu na obrázku 28 je patrné, že model (22) předpokládá mnohonásobně vyšší účinnost stínění elektromagnetického záření pro materiály s obsahem vodivé komponenty 15% a vyšším.



Obrázek 29: Průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie podle modelu (22)

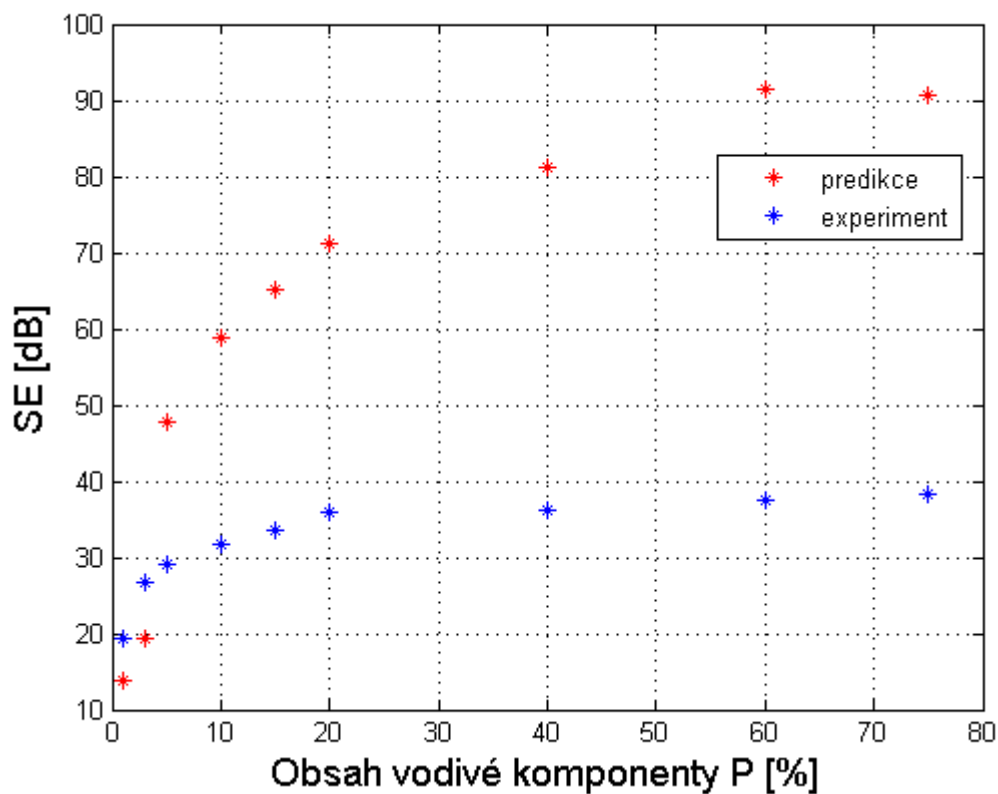
Z grafu na obrázku 29 jasně vyplývá, že nejnižší účinnost stínění předpokládá model (22) u textilií s nejnižším obsahem vodivé komponenty. Se zvyšujícím se množstvím vodivé složky v materiálu se zvyšuje i efektivita stínění. Výjimkou jsou opět pouze materiály s obsahem vodivých vláken 60 a 75%, kdy textilie s 60-ti% vodivé komponenty vykazuje vyšší efektivitu stínění než textilie s obsahem 75%.

### Model (23)

Výsledné hodnoty účinnosti stínění SE [dB] pro jednotlivé textilie s obsahem vodivé komponenty  $P$  [%] podle modelu (23) vychází v komplexních číslech a jsou uvedeny v tabulce 15. Graf na obrázku 30 porovnává závislost predikovaných hodnot účinnosti stínění se závislostí experimentálně zjištěných dat.

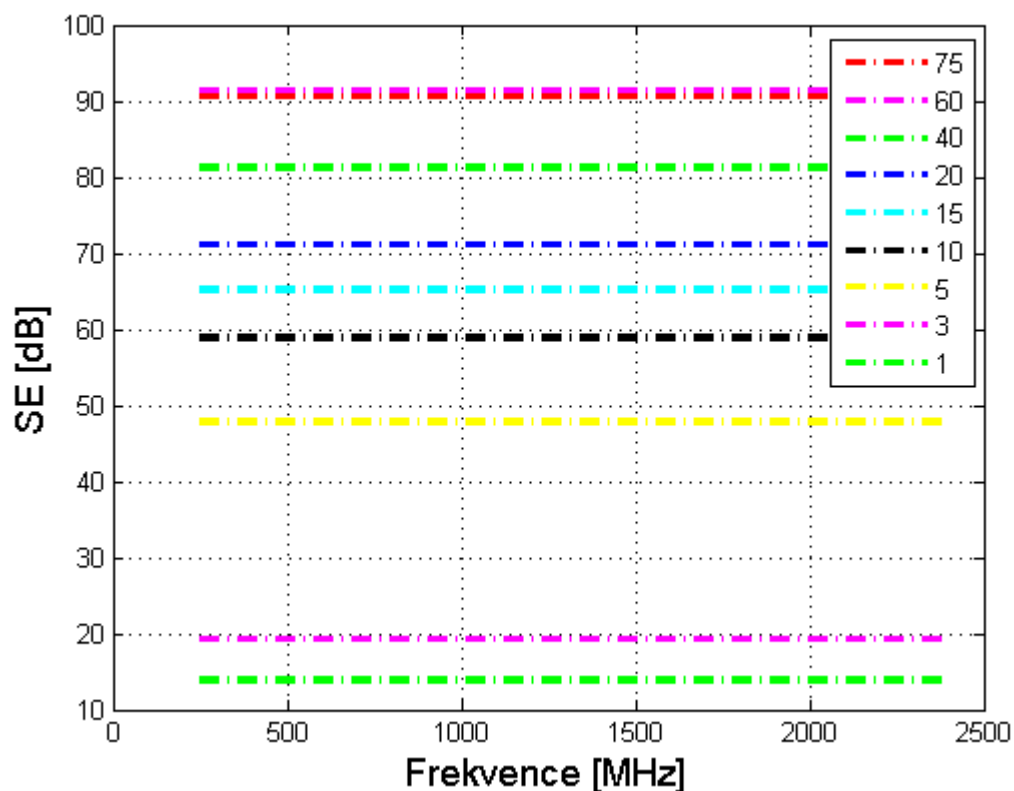
$P$ [%]	$SE$ [dB]	$SE_{\text{experiment}}$ [dB] $f=2,45\text{GHz}$
1%	13,9118 +27,2875i	19,26
3%	19,2706 +27,2875i	26,69
5%	47,8486+27,2875i	29,16
10%	58,8567+27,2875i	31,83
15%	65,1799+27,2875i	33,54
20%	71,1623+27,2875i	36,02
40%	81,3143+27,2875i	36,10
60%	91,3209+27,2875i	37,55
75%	90,6488+27,2875i	38,3

Tabulka 15: Hodnoty  $SE$  vypočtené podle modelu (23)



Obrázek 30: Porovnání závislostí (model (23))

Graf na obrázku 30, který porovnává závislost hodnot predikovaných modelem (23) se závislostí experimentálně zjištěných hodnot ukazuje, že model předpokládá nižší účinnost stínění pro materiály s obsahem vodivé komponenty 1 a 3%. Naopak pro materiály s obsahem vodivé složky 5% a více predikuje efektivitu stínění vyšší.



Obrázek 31: Průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie podle modelu (23)

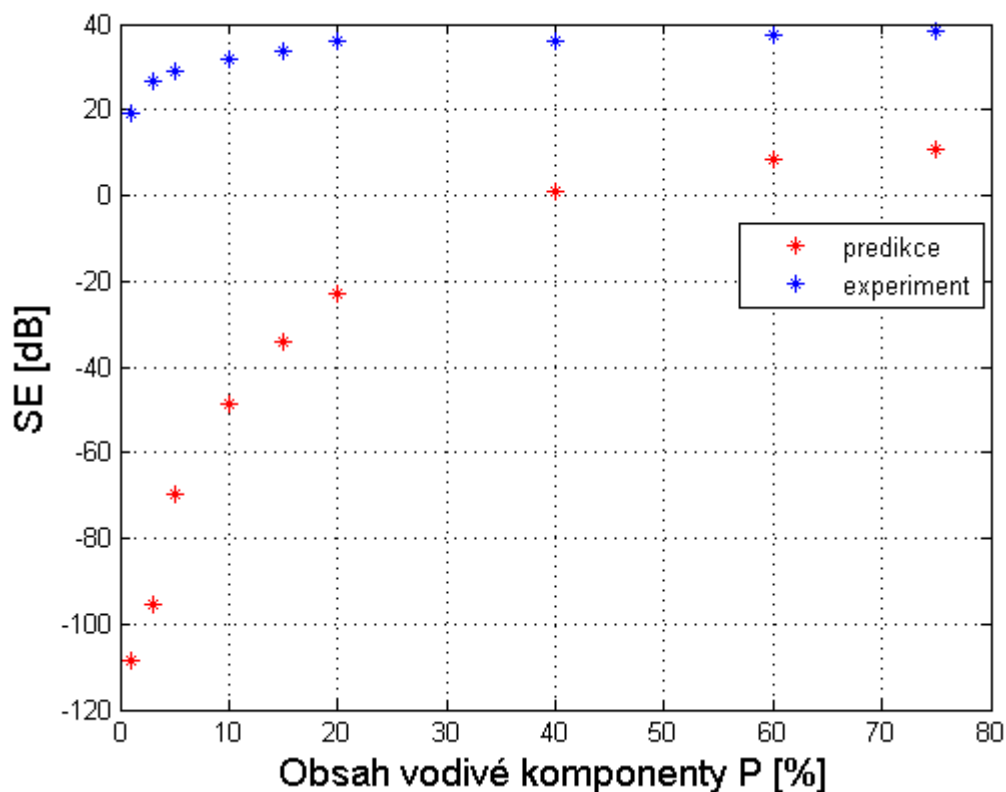
Model (23) předpokládá, že stínicí účinnost v závislosti na frekvenci je konstantní, jak ilustruje graf na obrázku 31.

### Model (24)

Poslední ověřovaný model využívá oproti ostatním uvedeným modelům při výpočtu povrchovou rezistivitu  $\rho_s$ . Skript pro výpočet tohoto modelu se od předchozích liší, je uveden v příloze 3. Hodnoty účinnosti stínění predikované tímto modelem zaznamenává tabulka 16. Model (24) není závislý na frekvenci. Závislost předpokládaných hodnot v porovnání se závislostí naměřených hodnot znázorňuje graf na obrázku 32.

$P$ [%]	$SE$ [dB]	$SE_{experiment}$ [dB] $f=2,45\text{GHz}$
1%	-108,6549	19,26
3%	-95,3585	26,69
5%	-69,4801	29,16
10%	-48,6381	31,83
15%	-34,2832	33,54
20%	-22,9553	36,02
40%	0,9163	36,10
60%	8,5205	37,55
75%	10,8587	38,3

Tabulka 16: Hodnoty  $SE$  vypočtené podle modelu (24)



Obrázek 32: Porovnání závislostí (model (24))

Závislost modelu (24) zachycená na obrázku 32 ukazuje, že tento model predikuje pro všechny textilie bez ohledu na obsah vodivé komponenty nižší efektivitu stínění elektromagnetického záření než byla skutečně experimentálně naměřena. Stejně jako ostatní modely i tento model předpovídá vzrůstající efektivitu stínění se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty v textilním materiálu.

## 9.1 Optimalizace konstant modelů

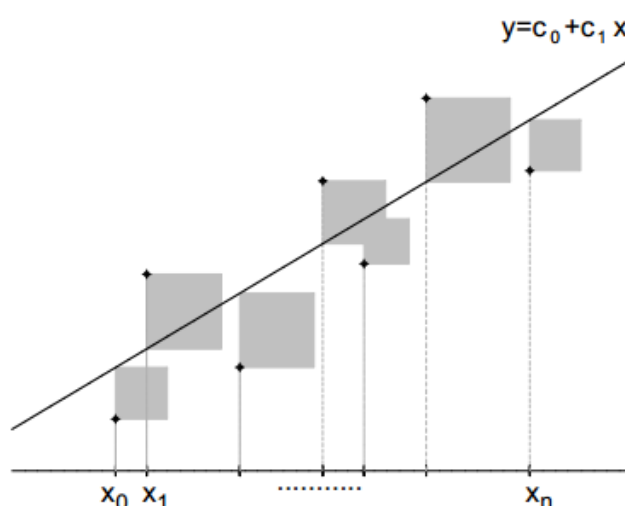
Snahou bylo optimalizovat konstanty vzorců takovým způsobem, aby křivky modelů odpovídaly co nejvíce křivce experimentálně zjištěných hodnot. Optimalizace byla provedena v programu MATLAB aplikací metody nejmenších čtverců.

Metoda nejmenších čtverců je metoda aproximace, která hledá takovou křivku, pro kterou je součet ploch čtverců odchylek minimální. Nejjednodušším typem je aproximace přímkou neboli lineární aproximace, která byla použita v tomto případě.

Aproximace přímkou vychází ze situace, kdy jsou dány body  $[x_i, y_i]$ ,  $i=0, \dots, n$ . Hledána je přímka o rovnici (41), která bude mezi těmi to body co nejlépe procházet.

$$y = c_0 + c_1 x \quad (41)$$

Jelikož jsou body  $[x_i, y_i]$  dány, tvar přímky závisí na koeficientech  $c_0$  a  $c_1$ . Vhodným kritériem pro určení trajektorie přímky je, aby součet ploch čtverců (neboli druhých mocnin) odchylek v jednotlivých bodech byl minimální, jak ilustruje obrázek 33 [30].



Obrázek 33: Metoda nejmenších čtverců <sup>[30]</sup>

Aby bylo v případě matematických modelů z podkapitoly 4.2.1 možno použít lineární aproximaci, byly vytvořeny členy  $x_1$  a  $x_2$ , které obsahují také nezbytné konstanty ve výpočtu. V případě modelů (15), (16), (17) a (19) jsou hledány tři neznámé  $c_0$ ,  $c_1$  a  $c_2$ . Hledaná přímka má v tomto případě tvar (42).

$$y = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 \quad (42)$$

U modelů (20), (21), (22) a (23) jsou hledány čtyři neznámé. Je tedy třeba vytvořit členy  $x_1$ ,  $x_2$  a  $x_3$  pro skrytí částí vzorců. Hledaná přímka má v tomto případě tvar (43).



$$y = c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 \quad (43)$$

V případě posledního navrženého matematického modelu, modelu (24), jsou hledány pouze dvě neznámé. Přímka má v tomto případě tvar (41).

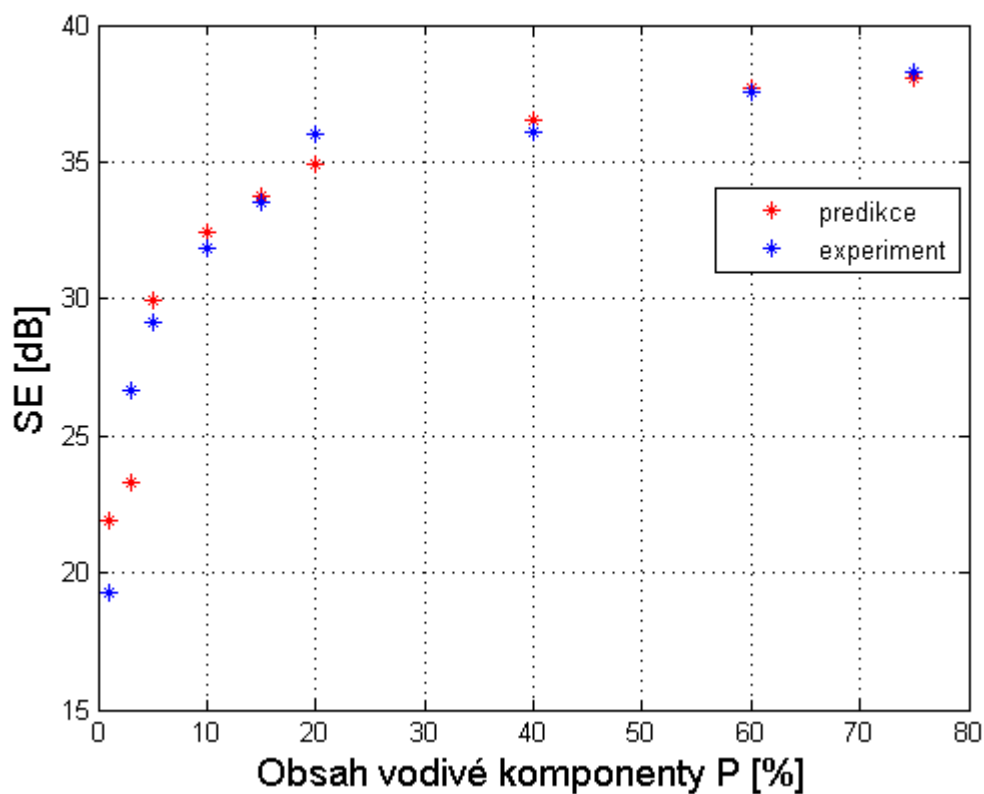
Jak již bylo výše zmíněno, optimalizování konstant bylo provedeno v programu MATLAB metodou nejmenších čtverců v maticovém tvaru. Příkazem `regress(y,z)` byly vypočteny hledané konstanty. Optimalizace byla provedena u všech modelů. V následujících části práce jsou vybrány dva modely, jejichž závislosti po optimalizaci nejlépe odpovídají závislostem experimentálně zjištěných hodnot účinnosti stínění.

### 9.1.1 Optimalizace modelu (19)

Nově vypočtené konstanty pro model (19) jsou  $x_1=102$ ,  $x_2=(-5)$  a  $x_3=(-34915)$ . Optimalizovaný model tedy bude mít tvar (44).

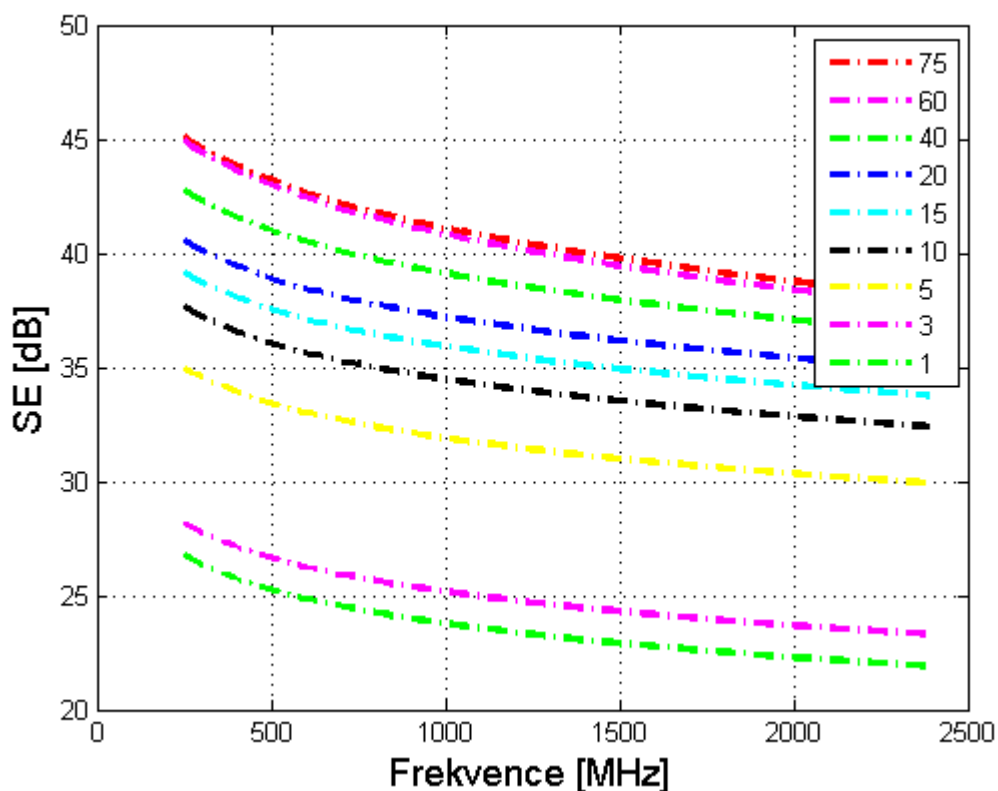
$$SE = 102 - 5 \log \left( \frac{K_C * f}{\sigma} \right) - 34915t \sqrt{\frac{\sigma}{K_C * f}} \quad (44)$$

Závislost optimalizovaného modelu predikce účinnosti stínění elektromagnetického záření byla porovnána se závislostí experimentálně zjištěných hodnot. Obě tyto závislosti zaznamenává graf na obrázku 34. Graf na obrázku 35 pak ukazuje průběh účinnosti stínění jednotlivých materiálů v závislosti na frekvenci. Skript pro optimalizaci modelu (19) v programu MATLAB je vložen v příloze 4.



Obrázek 34: Porovnání závislostí (optimalizovaný model (19))

Graf na obrázku 34 ukazuje, že optimalizovaný model (19) se se skutečnými hodnotami efektivity stínění elektromagnetického záření výrazněji rozchází pouze u textilií s nízkým obsahem kovových vláken, konkrétně s obsahem 1% a 3% (tzn. oblast pod perkolačním prahem). U textilií s obsahem vodivých vláken 5% a více (oblast nad perkolačním prahem) jsou rozdíly mezi předpokládanou a skutečnou hodnotou minimální.



Obrázek 35: Průběh účinnosti stínění podle optimalizovaného modelu (19)

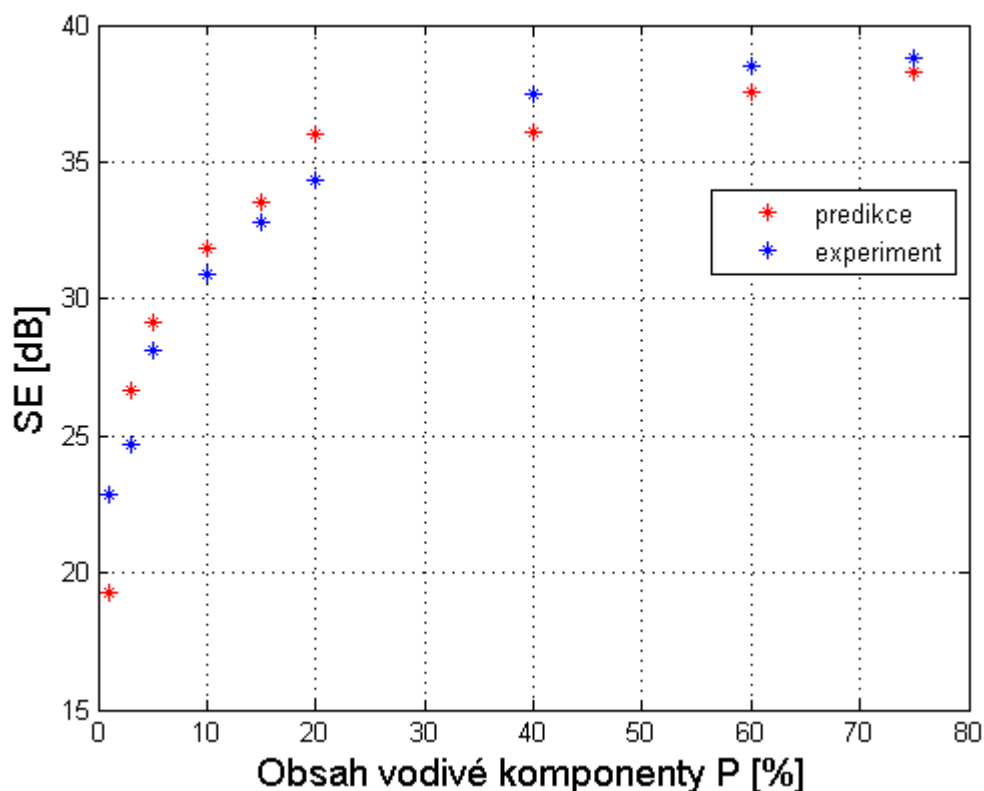
Graf na obrázku 35 ilustruje průběh účinnosti stínění podle optimalizovaného modelu (19). Tvar závislostí zůstává po optimalizaci nezměněn, hodnoty účinnosti stínění elektromagnetického záření se optimalizací konstant snižují.

### 9.1.2 Optimalizace modelu (24)

V modelu (24) byly optimalizovány pouze dvě konstanty. Jejich zjištěná velikost je  $x_1 = (-2,68)$  a  $x_2 = 43,04$ . Vzorec tohoto modelu po optimalizaci bude mít tvar (45).

$$SE = (-2,68) + 43,04 \log(\rho_s) \quad (45)$$

Graf na obrázku 36 opět porovnává předpokládanou závislost efektivity stínění se závislostí skutečných hodnot zjištěných experimentálním měřením. Skript pro optimalizaci tohoto modelu je uveden v příloze 5.



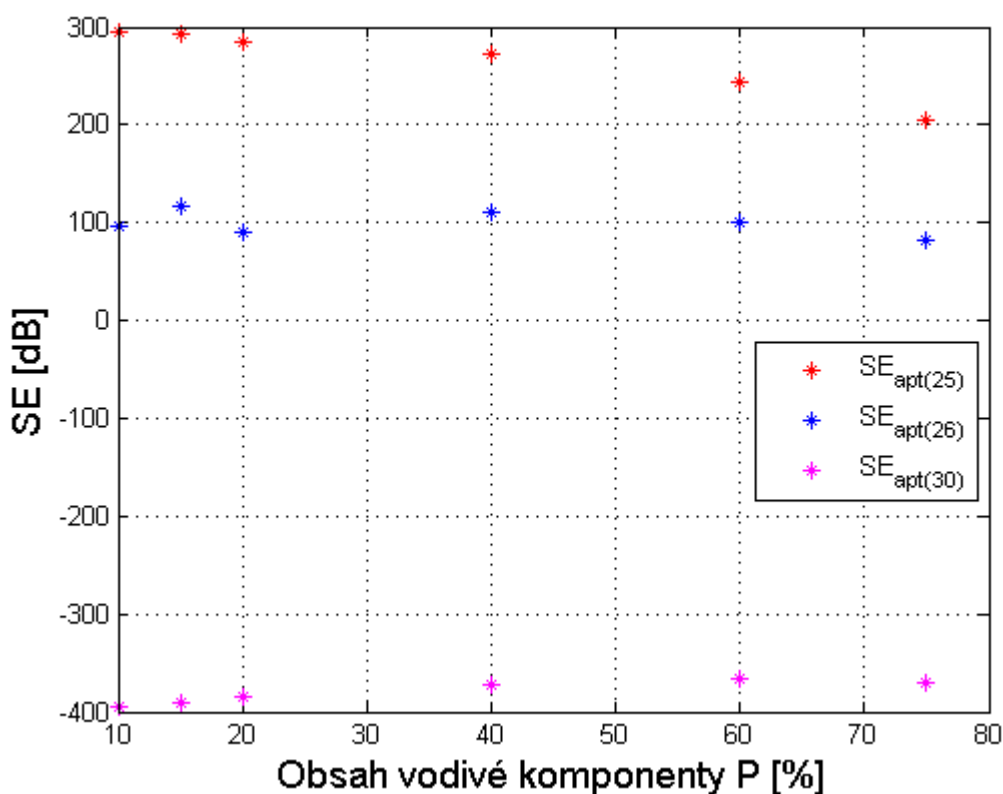
Obrázek 36: Porovnání závislostí (optimalizovaný model (24))

Stejně jako u předchozího optimalizovaného modelu i u tohoto jsou větší rozdíly mezi předpokládanými a skutečně naměřenými hodnotami pouze u textilií s obsahem vodivé složky menší než 5%, tzn. pod perkolačním prahem obsahu vodivé komponenty ve vzorku.

Optimalizace metodou nejmenších čtverců v programu MATLAB byla provedena i u ostatních modelů. Nově vypočtené konstanty, grafické porovnání závislostí a průběhy účinnosti stínění pro jednotlivé textilie v závislosti na frekvenci zbývajících sedmi modelů jsou uvedeny v příloze 6.

## 10 Zeslabení účinnosti stínící přepážky způsobené otvory v oblasti vazných bodů

V podkapitole 4.2.2 je uvedeno 5 matematických modelů zabývajících se stíněním samotných otvorů v oblasti vazných bodů. Textilie vybrané k tomuto experimentálnímu měření nesplňují podmínky pro výpočet modelů (28) a (29), rozměry otvorů v tomto případě nejsou větší než tloušťka textilie. Modely (28) a (29) byly proto z dalšího ověřování vynechány. Zbývající tři modely při výpočtu vychází z geometrických rozměrů pórů zjištěných obrazovou analýzou mikroskopických snímků textilií. Obrázek 37 ukazuje graf závislosti účinnosti stínění samotných otvorů na obsahu vodivé komponenty pro frekvenci 2,4 GHz. Graf na obrázku 38 ilustruje závislost účinnosti stínění otvorů na frekvenci.



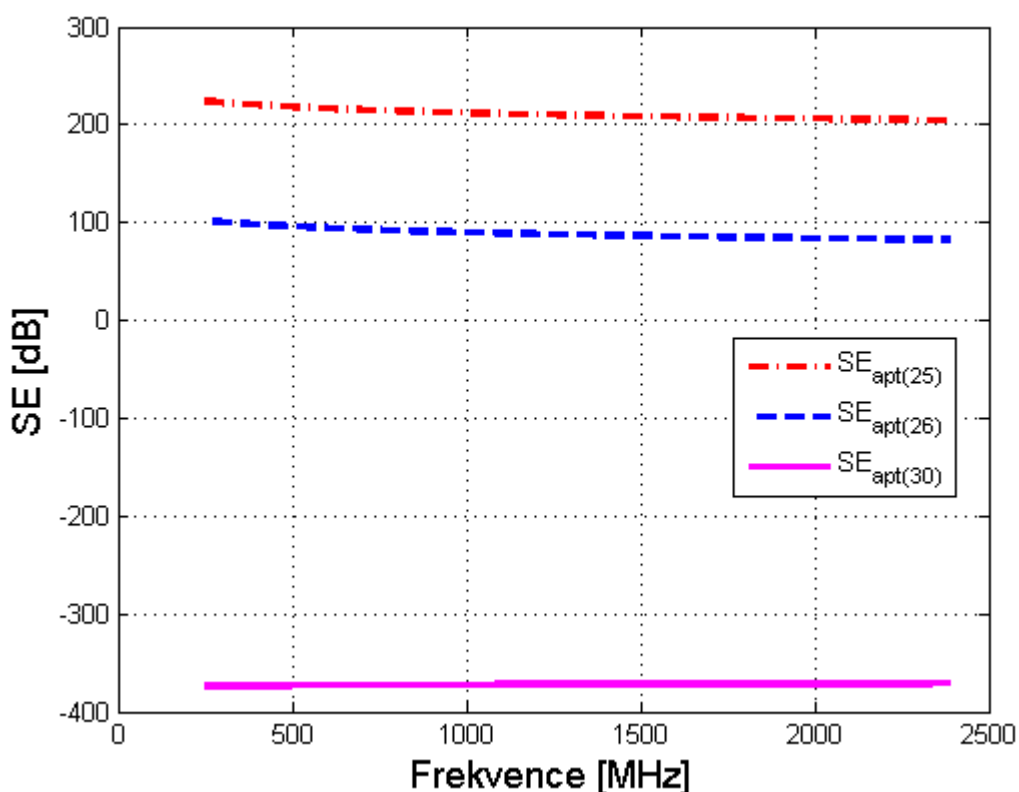
Obrázek 37: Účinnost stínění otvorů v závislosti na obsahu vodivé komponenty

Graf na obrázku 37 ilustruje závislost účinnosti stínění otvorů v oblasti vazných bodů na obsahu vodivé komponenty. Model (25) předpokládá, že účinnost stínění otvorů se bude snižovat se zvyšujícím se množstvím vodivé komponenty v materiálu. Jak již bylo zmíněno, čím vyšší je obsah vodivé složky v materiálu, tím větší jsou

otvory mezi vaznými body. Model (25) tedy předpokládá, že větší otvory mají nižší účinnost stínění elektromagnetického záření.

Model (26) pro výpočet stínění samotných otvorů předpokládá klesající účinnost stínění se zvyšujícím se obsahem vodivé složky, tedy většími otvory, ovšem v menší míře než předchozí model.

Výjimkou je model (30), který s větším obsahem vodivé komponenty predikuje mírný nárůst účinnosti stínění samotných otvorů.



Obrázek 38: Účinnost stínění otvorů v závislosti na frekvenci

Obrázek 38 ilustruje graf závislosti účinnosti stínění samotných otvorů na frekvenci, stanovenou pro vzorek s obsahem vodivé komponenty 75%. Modely (25) a (26) předpokládají, že účinnost stínění otvorů mezi vaznými body bude se stoupající frekvencí mírně klesat. Naopak model (30) opět predikuje nepatrný nárůst účinnosti stínění při větší frekvenci.

## 11 Kombinace obou přístupů

V podkapitole 4.2.3 je navržena kombinace dvou modelů, která má za cíl dosáhnout přesnějšího výpočtu efektivity stínění. Kombinován je vždy jeden z modelů pro stanovení efektivity stínění homogenní bariéry a jeden z modelů pro výpočet elektromagnetického stínění samotných otvorů v oblasti mezi vaznými body textilie. Pro ověření této teorie byly provedeny výpočty a vykresleny grafy kombinací devíti matematických modelů pro výpočet efektivity stínění homogenní přepážky se všemi třemi modely výpočtu stínění samotných otvorů.

### 11.1 Kombinace s modelem (19)

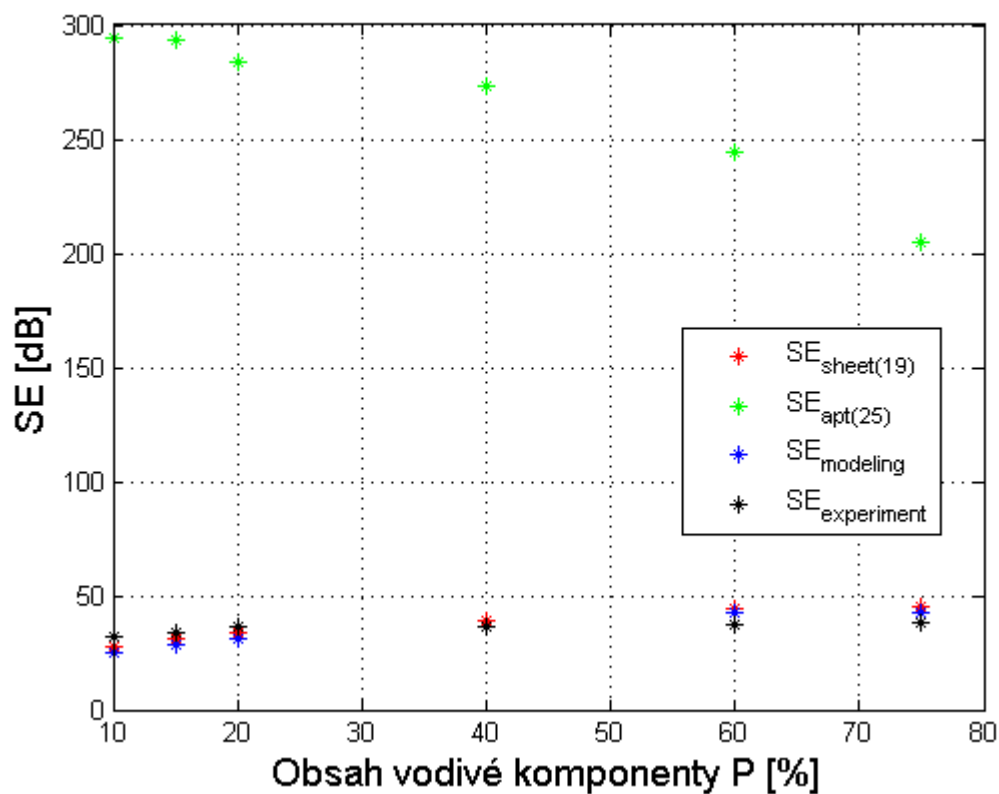
Jako jeden z nejvhodnějších modelů pro kombinování se jeví model (19), jehož závislost  $SE$  [dB] na obsahu vodivé komponenty  $P$  [%] dobře odpovídá závislosti experimentálně zjištěných hodnot a zároveň se vypočtené hodnoty liší od naměřených jen minimálně ve srovnání s ostatními modely.

#### Kombinace modelu (19) s modelem (25)

Jako první byla ověřována kombinace modelů (19) s modelem (25). Tabulka 17 uvádí výsledné hodnoty kombinace pro frekvenci 2,4GHz.

Obsah vodivé složky	Stínění otvorů $SE_{apt(25)}$ [dB]	Stínění přepážky $SE_{sheet(19)}$ [dB]	Kombinace $SE_{modeling}$ [dB]	Experiment. hodnoty $SE_{experiment}$ [dB]
10%	294,3112	27,6744	24,9226	31,8300
15%	293,4198	30,9534	28,3029	33,5400
20%	284,1436	34,0407	31,4250	36,0200
40%	273,3877	39,1870	36,6083	36,1000
60%	244,1736	44,6357	42,1651	37,5500
75%	204,4414	44,7771	42,1565	38,3000

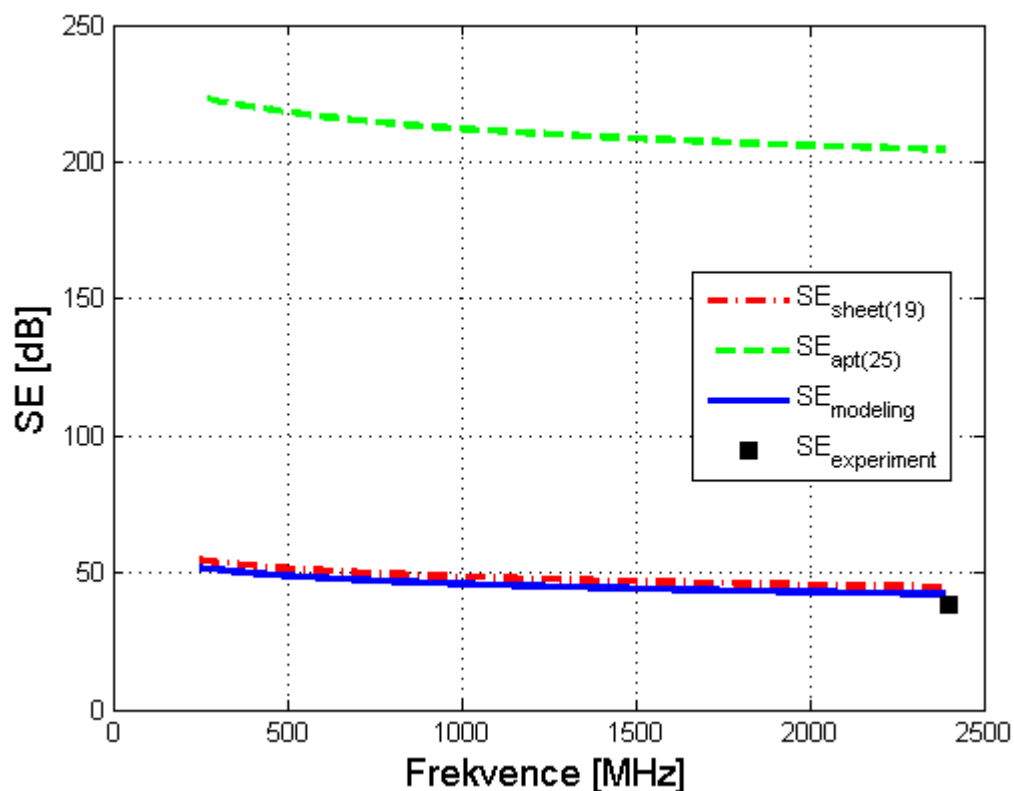
Tabulka 17: Výsledné hodnoty kombinace modelů (19) a (25)



Obrázek 39: Kombinace modelu (19) s modelem (25) 1

Graf na obrázku 39 ukazuje, že kombinováním modelu (19) pro výpočet stínění homogenní přepážky s modelem (25) pro výpočet stínění samotných otvorů jsou získány výsledné hodnoty, které se velmi blíží experimentálně zjištěným datům. U materiálů s nižším obsahem vodivé komponenty se modelované hodnoty od experimentálně zjištěných vzdalují. U textilií s obsahem vodivé komponenty 40% modelovaná hodnota odpovídá experimentálně zjištěné a u textilií s vyšším obsahem vodivé komponenty se modelované hodnoty od skutečných liší jen minimálně.





Obrázek 40: Kombinace modelu (19) s modelem (25) 2

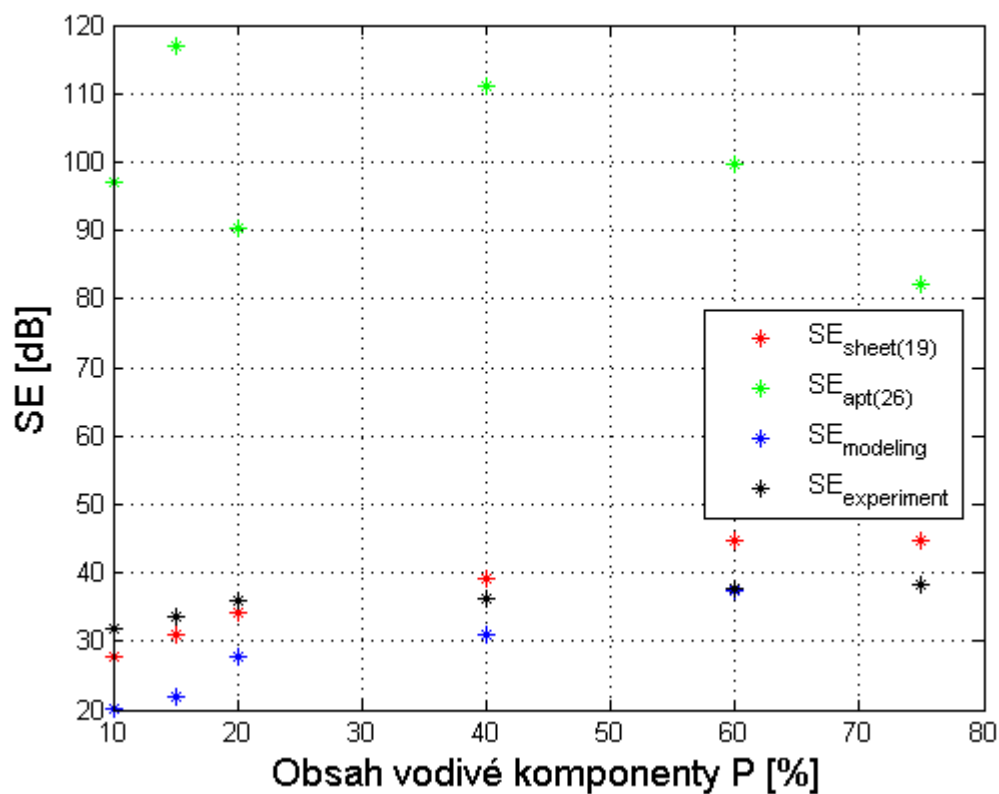
Závislost účinnosti stínění materiálu s obsahem vodivé komponenty 75% na frekvenci, kterou ilustruje graf na obrázku 40, ukazuje, že závislost modelovaných hodnot (37) se blíží experimentálně zjištěným datům více než závislost modelu (19).

#### Kombinace modelu (19) s modelem (26)

Matematický model (19) byl dále kombinován s modelem (26). Výsledky kombinace zaznamenává následující tabulka 18.

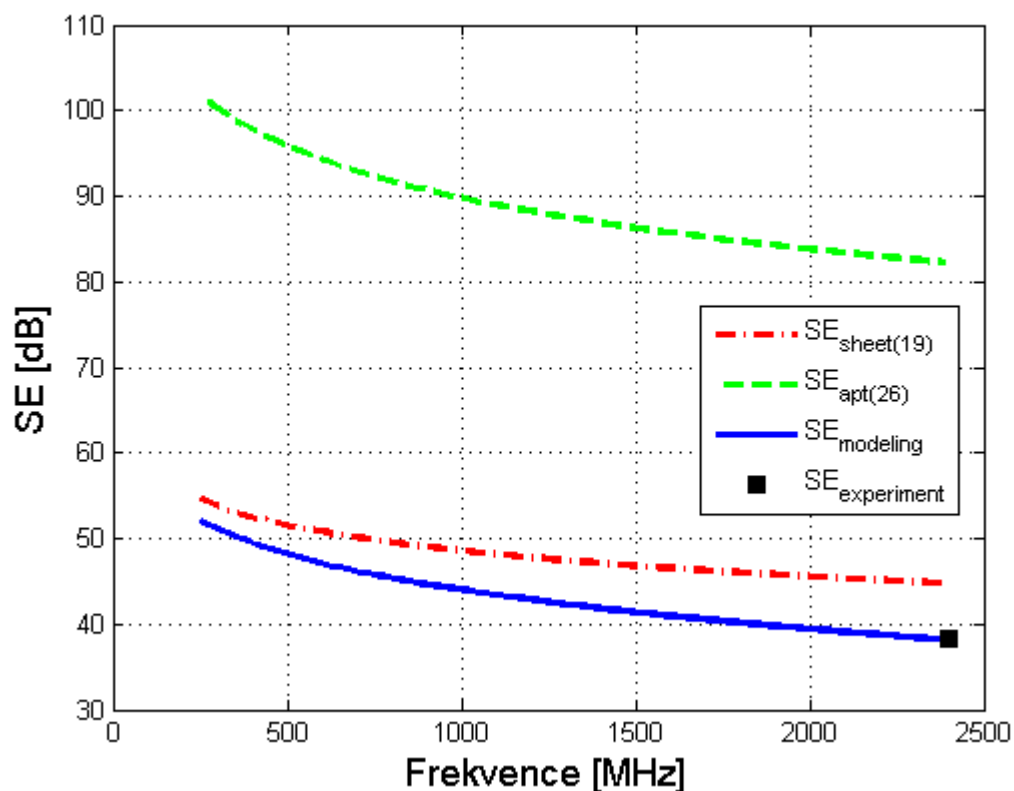
Obsah vodivé složky	Stínění otvorů $SE_{apr(26)}$ [dB]	Stínění přepážky $SE_{sheet(19)}$ [dB]	Kombinace $SE_{modeling}$ [dB]	Experiment. hodnoty $SE_{experiment}$ [dB]
10%	97,0407	27,6744	20,1906	31,8300
15%	117,0084	30,9534	21,8775	33,5400
20%	90,2454	34,0407	27,8919	36,0200
40%	111,2008	39,1870	30,8724	36,1000
60%	99,6235	44,6357	37,4527	37,5500
75%	82,2407	44,7771	38,1698	38,3000

Tabulka 18: Výsledné hodnoty kombinace modelů (19) a (26)



Obrázek 41: Kombinace modelu (19) s modelem (26) 1

Grafické znázornění výsledků kombinace modelů (19) a (26) na obrázku 41 dokazuje, že se zvyšujícím se množstvím vodivé komponenty v materiálu se modelované hodnoty více přibližují skutečně naměřeným.



Obrázek 42: Kombinace modelu (19) s modelem (26) 2

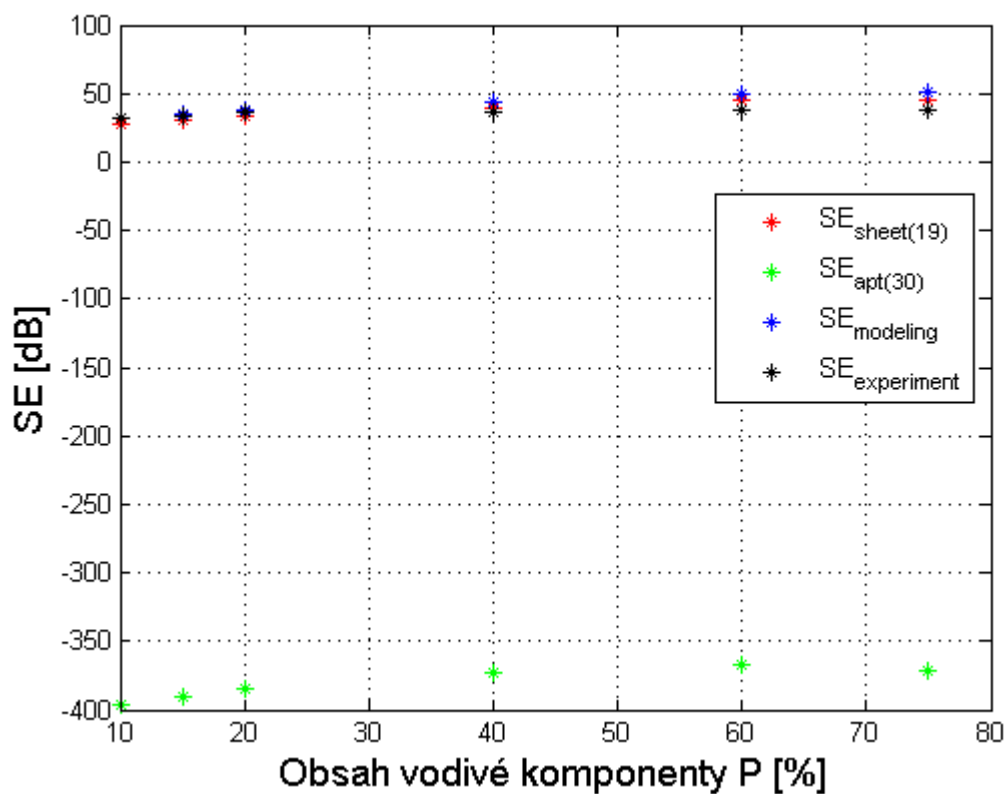
Graf na obrázku 42, který ilustruje závislost účinnosti stínění  $SE$  [dB] materiálu s obsahem vodivé složky 75% na frekvenci [MHz] dokazuje, že kombinací modelů (19) a (26) je získána závislost, která v bodě 2400 MHz odpovídá experimentálně zjištěným hodnotám. Kombinace těchto dvou modelů nejvíce odpovídá skutečnosti.

### Kombinace modelu (19) s modelem (30)

Posledním modelem pro výpočet efektivity stínění samotných otvor, který byl kombinován s modelem (19) je model (30). Výsledné hodnoty uvádí tabulka 19.

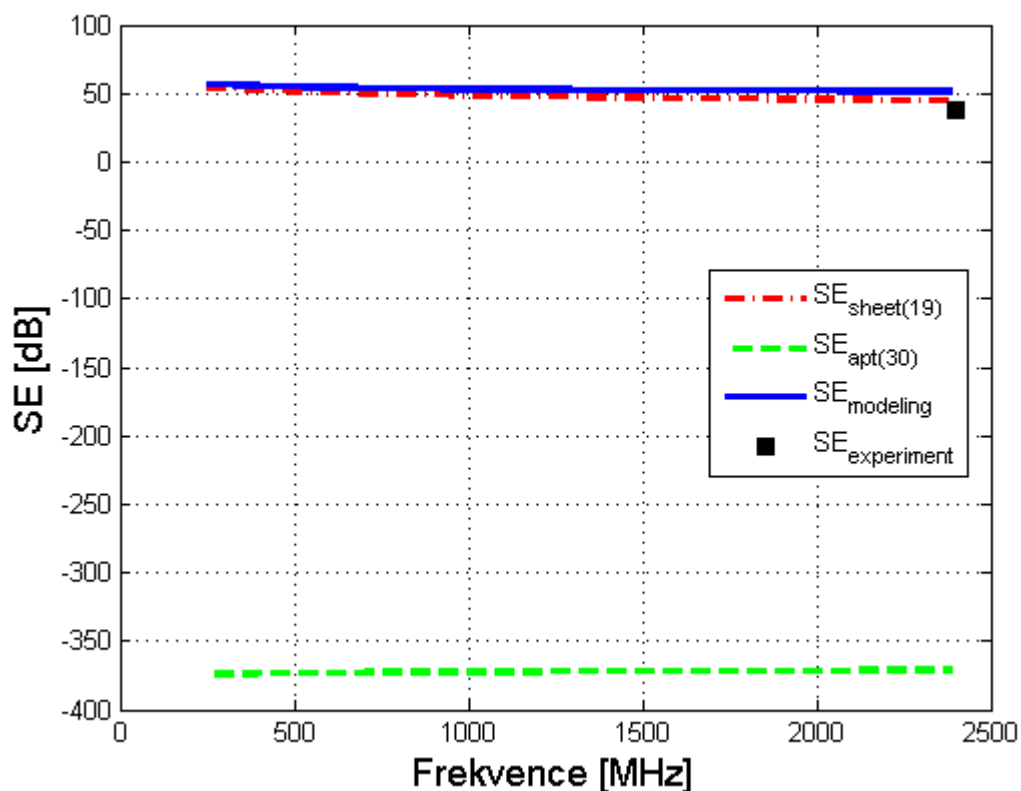
Obsah vodivé složky	Stínění otvorů $SE_{apr(30)}$ [dB]	Stínění přepážky $SE_{sheet(19)}$ [dB]	Kombinace $SE_{modeling}$ [dB]	Experiment. hodnoty $SE_{experiment}$ [dB]
10%	-395,7356	27,6744	32,0348	31,8300
15%	-390,4781	30,9534	35,2004	33,5400
20%	-384,7198	34,0407	38,4113	36,0200
40%	-373,3565	39,1870	43,7198	36,1000
60%	-366,5038	44,6357	49,7155	37,5500
75%	-371,3204	44,7771	51,5923	38,3000

Tabulka 19: Výsledné hodnoty kombinace modelů (19) a (30)



Obrázek 43: Kombinace modelu (19) s modelem (30) 1

Model (30) predikuje účinnost stínění samotných otvorů zápornou. V kombinaci s modelem (19) se však výsledná modelovaná hodnota efektivity stínění od experimentálně získaných dat vzdaluje, jak ilustruje graf na obrázku 43. Model (30) se proto jeví jako nejméně vhodný pro kombinování s modelem (19).



Obrázek 44: Kombinace modelu (19) s modelem (30) 2

Obrázek 44 potvrzuje výše uvedený závěr. V závislosti na frekvenci se modelovaná účinnost stínění materiálu s obsahem vodivé komponenty 75% také vzdaluje od experimentálně získaných hodnot. Model (30) tedy není vhodným pro kombinování s modelem (19).

## 11.2 Kombinace s modelem (15)

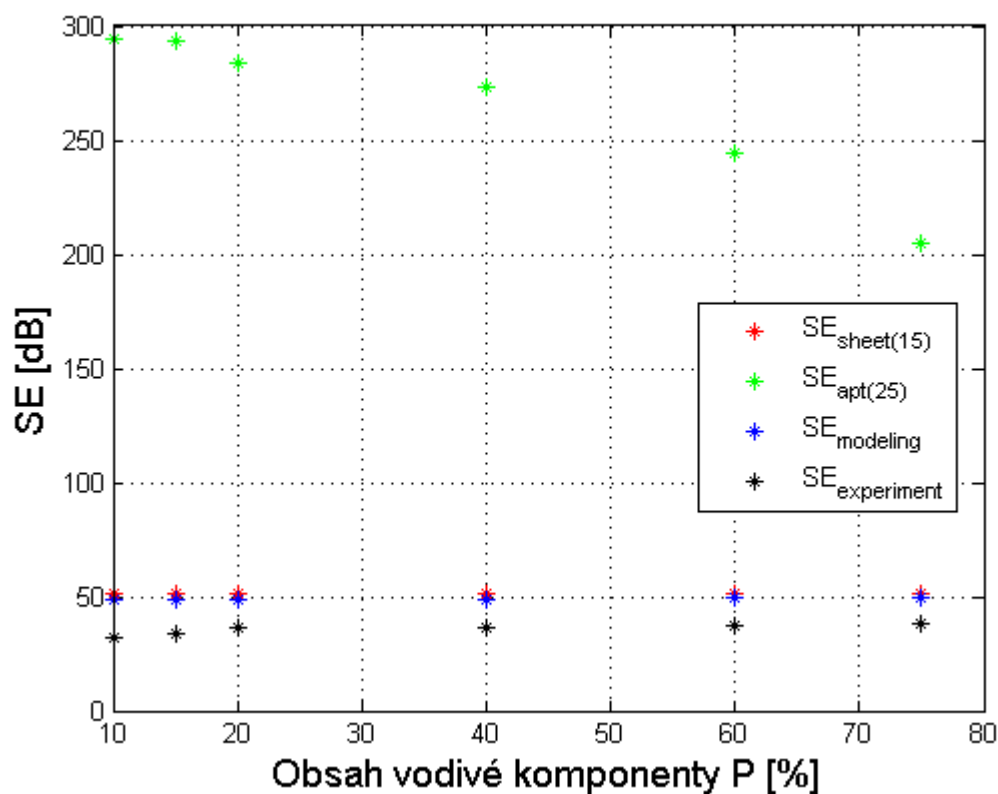
Výpočty a zkonstruování grafů bylo provedeno pro všech 9 modelů výpočtu efektivity stínění homogenní přepážky. Výsledné hodnoty a grafická znázornění byla porovnána a model (15) byl druhým vybraným modelem vhodným pro kombinování s modely výpočtu účinnosti stínění samotných otvorů. Matematický model (15) byl, stejně jako výše uvedený model, kombinován se všemi třemi modely výpočtu stínění otvorů mezi vaznými body textilie.

### Kombinace modelu (15) s modelem (25)

Výsledné hodnoty kombinace modelu (15) s modelem (25) uvádí tabulka 20.

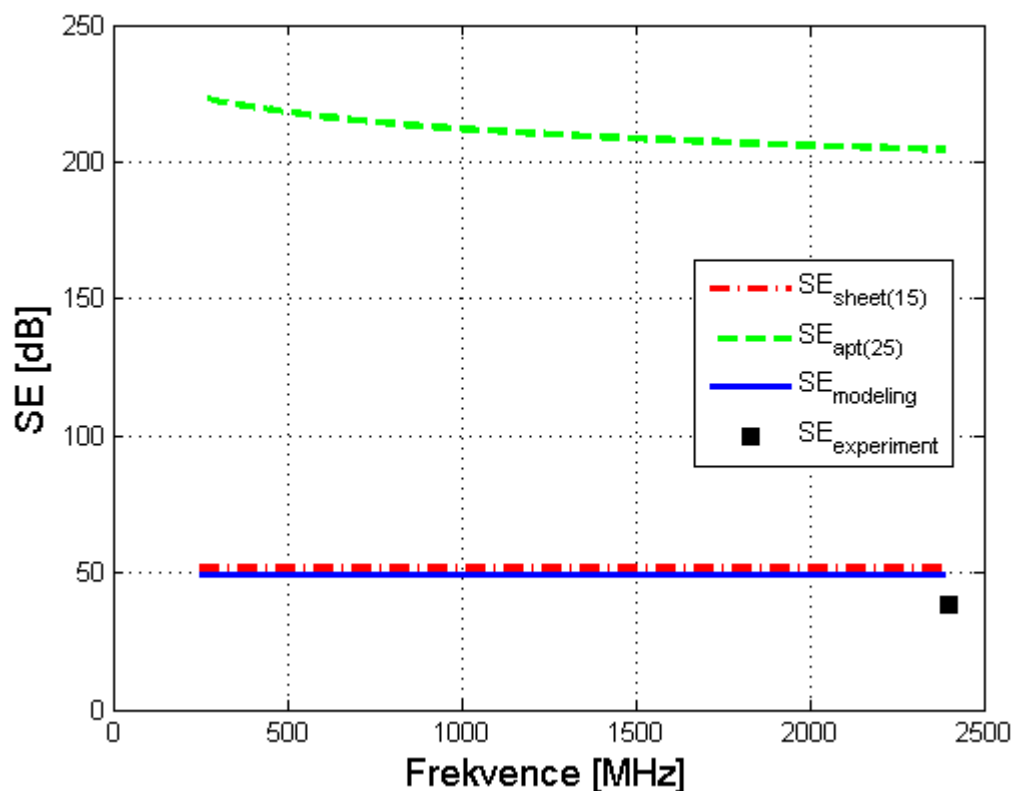
Obsah vodivé složky	Stínění otvorů $SE_{apt(25)}$ [dB]	Stínění přepážky $SE_{sheet(15)}$ [dB]	Kombinace $SE_{modeling}$ [dB]	Experiment. hodnoty $SE_{experiment}$ [dB]
10%	294,3112	51,2319	48,7233	31,8300
15%	293,4198	51,2913	48,8461	33,5400
20%	284,1436	51,3548	48,9201	36,0200
40%	273,3877	51,4841	49,0409	36,1000
60%	244,1736	51,6551	49,2715	37,5500
75%	204,4414	51,6465	49,1386	38,3000

Tabulka 20: Výsledné hodnoty kombinace modelů (15) a (25)



Obrázek 45: Kombinace modelu (15) s modelem (25) 1

Model (15) v základním tvaru predikuje vyšší účinnost stínění než je skutečná naměřená. Kombinací s modelem (25) jsou získány hodnoty, které se experimentálně zjištěným datům blíží více. Rozdíl však není příliš velký, jak je zřejmé z grafu na obrázku 45.



Obrázek 46: Kombinace modelu (15) s modelem (25) 2

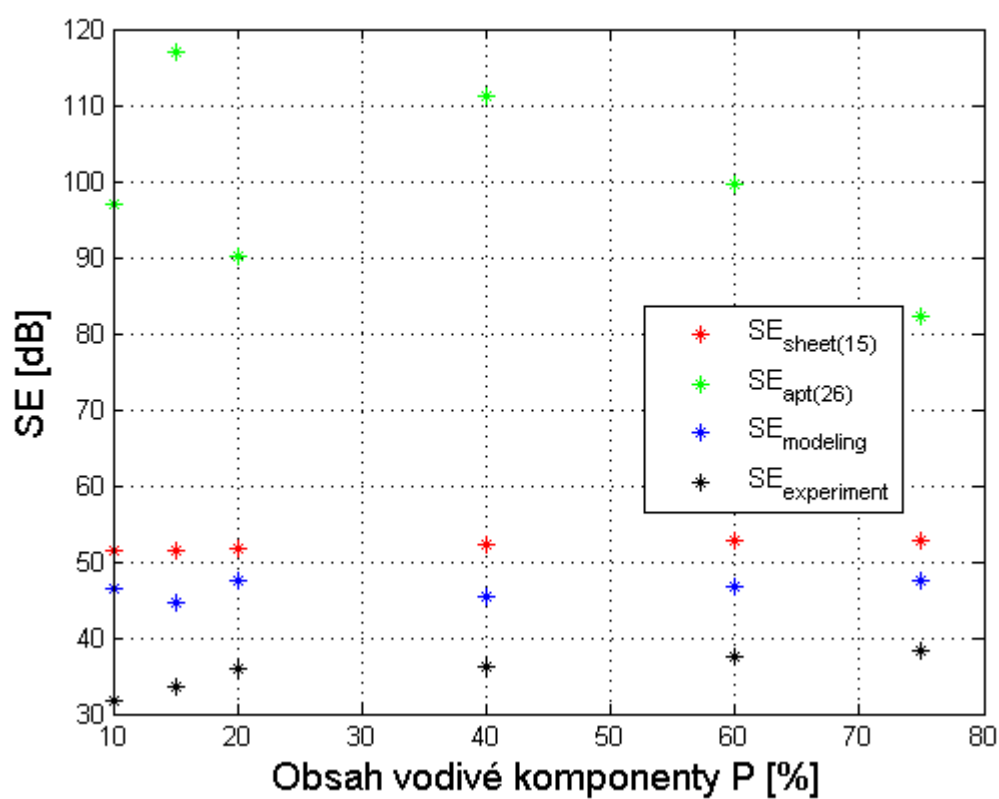
Závislost  $SE$  [dB] materiálu s obsahem vodivé komponenty 75% na frekvenci [MHz] také předpokládá přiblížení modelovaných hodnot k experimentálně zjištěným datům. Závislost se na první pohled jeví vodorovná. Účinnost stínění není pro různé frekvence stejná, liší se však pouze nepatrně. To je dáno výchozím tvarem modelu (15). Kombinováním s modelem (25) se tvar závislosti nemění. Situaci ilustruje graf na obrázku 46.

### Kombinace modelu (15) s modelem (26)

Kombinováním modelu (15) s modelem (26) jsou získány výsledné hodnoty uvedené v tabulce 21.

Obsah vodivé složky	Stínění otvorů $SE_{apt(26)}$ [dB]	Stínění přepážky $SE_{sheet(15)}$ [dB]	Kombinace $SE_{modeling}$ [dB]	Experiment. hodnoty $SE_{experiment}$ [dB]
10%	97,0407	51,2319	48,7233	31,8300
15%	117,0084	51,2913	48,8461	33,5400
20%	90,2454	51,3548	48,9201	36,0200
40%	111,2008	51,4841	49,0409	36,1000
60%	99,6235	51,6551	49,2715	37,5500
75%	82,2407	51,6465	49,1386	38,3000

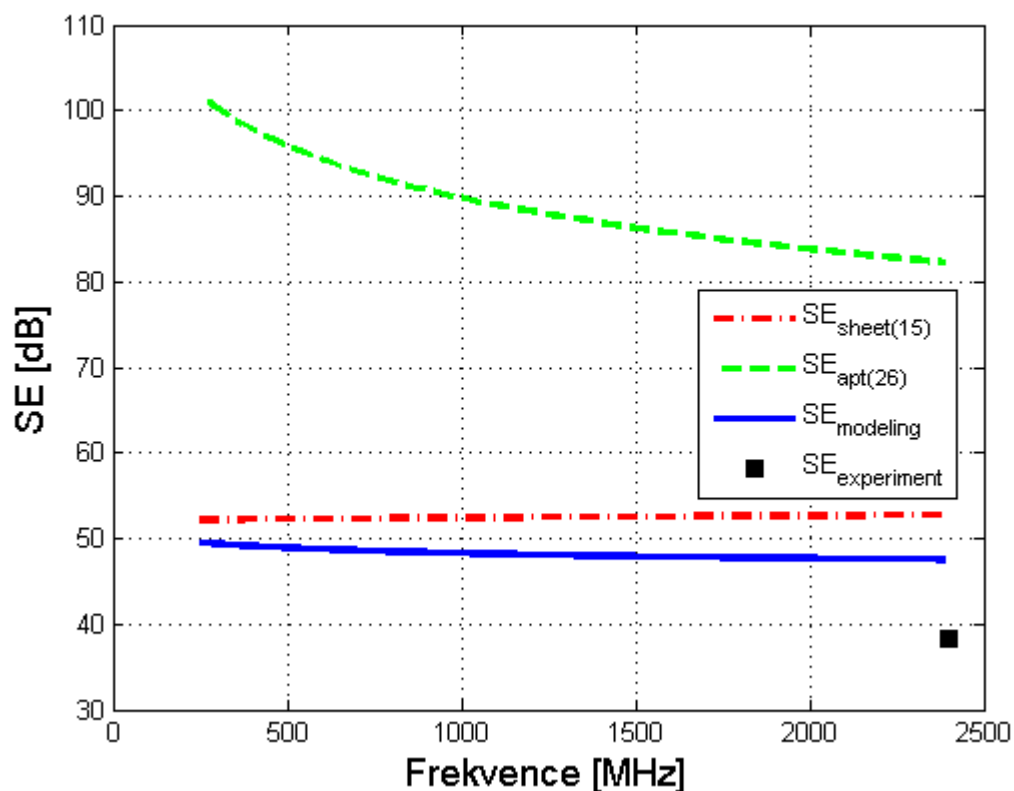
Tabulka 21: Výsledné hodnoty kombinace modelů (15) a (26)



Obrázek 47: Kombinace modelu (15) s modelem (26) 1

Kombinováním modelu (15) s modelem (26) je dosaženo účinnosti stínění přibližující se k experimentálně zjištěným hodnotám u všech případů textilií, jak ilustruje graf na obrázku 47.





Obrázek 48: Kombinace modelu (15) s modelem (26) 2

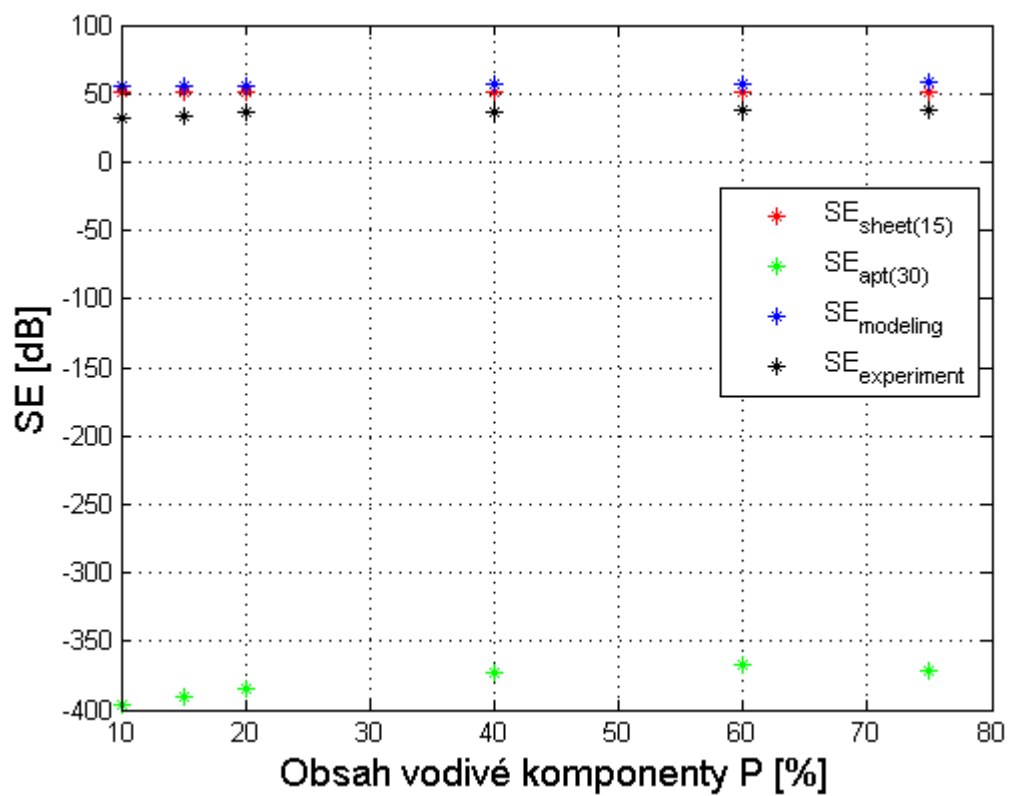
Závislost účinnosti stínění vzorku s obsahem vodivé komponenty 75% na frekvenci na obrázku 48 predikuje výraznější přiblížení k experimentálně zjištěným datům.

### Kombinace modelu (15) s modelem (30)

Posledním modelem pro výpočet efektivity stínění samotných otvorů, který je kombinován s modelem (15) je model (30). Výsledné hodnoty uvádí tabulka 22.

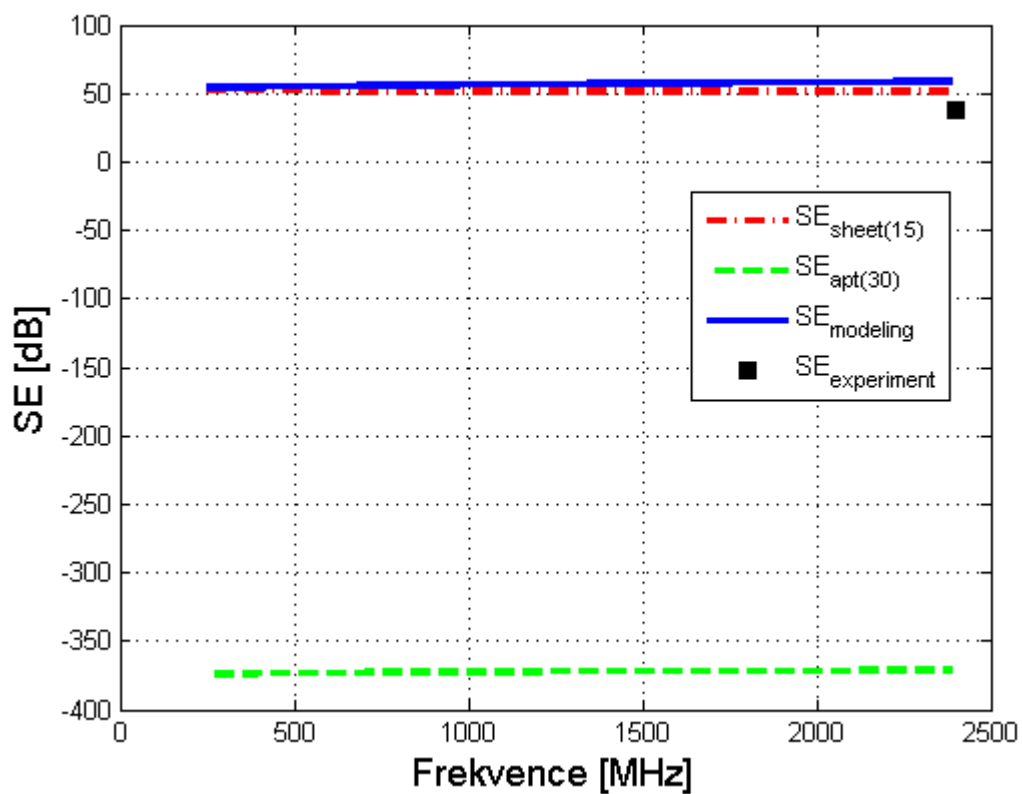
Obsah vodivé složky	Stínění otvorů $SE_{apt(30)}$ [dB]	Stínění přepážky $SE_{sheet(15)}$ [dB]	Kombinace $SE_{modeling}$ [dB]	Experiment. hodnoty $SE_{experiment}$ [dB]
10%	-395,7356	51,2319	55,8350	31,8300
15%	-390,4781	51,2913	55,7432	33,5400
20%	-384,7198	51,3548	55,9061	36,0200
40%	-373,3565	51,4841	56,1521	36,1000
60%	-366,5038	51,6551	56,8216	37,5500
75%	-371,3204	51,6465	58,5742	38,3000

Tabulka 22: Výsledné hodnoty kombinace modelů (15) a (30)



Obrázek 49: Kombinace modelu (15) s modelem (30) 1

Grafické znázornění výsledků kombinace modelů (15) a (30) na obrázku 49 ukazuje, že modelované hodnoty se od experimentálně získaných vzdalují, místo aby se přibližovaly.



Obrázek 50: Kombinace modelu (15) s modelem (30) 2

Graf na obrázku 50, který ilustruje závislost účinnosti stínění  $SE$  [dB] vzorku s obsahem vodivé složky 75% na frekvenci [MHz] dokazuje, že kombinací modelů (15) a (30) je získána závislost, která se od závislosti experimentálně zjištěných hodnot vzdaluje. Kombinace těchto dvou modelů tedy není vhodná.

## IV. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo provést literární rešerši ohledně elektromagnetického záření, jeho působení na zdraví člověka, způsobů stínění a především vytipovat vhodné matematické modely pro predikci efektivity stínění elektromagnetického záření. Dalším cílem práce bylo tyto modely aplikovat na sadu textilií se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty, která zvyšuje elektrickou vodivost materiálu. Následně vytipované modely optimalizovat a kombinovat různé přístupy tak, aby výsledkem byl nejvhodnější model pro predikci efektivity elektromagnetického stínění textilií.

První skupina modelů založená na elektrických vlastnostech materiálu vychází z předpokladu, že stínicí přepážka je kompaktní materiál neobsahující žádné nespojitosti, což zcela neodpovídá realitě. Pro ověření matematických modelů byly vybrány textilie s obsahem vodivé složky 1, 3, 5, 10, 15, 20, 40, 60 a 75%. Všechny devět modelů navržených v rešeršní části bylo aplikováno na tuto sadu materiálů se zvýšenou elektrickou vodivostí. Pro každý model byla programem MATLAB vykreslena závislost účinnosti stínění  $SE$  [dB] na obsahu vodivé komponenty  $P$  [%], která byla porovnána s experimentálně zjištěnými hodnotami, dále pak závislost  $SE$  [dB] na frekvenci [MHz]. Účinnost stínění byla predikována pro frekvenci 2,45 GHz, aby mohla být porovnatelná s experimentálně zjištěnými hodnotami, které byly měřeny při této frekvenci.

Bylo zjištěno, že všechny modely bez výjimky predikují zvyšující se účinnost stínění pro materiály se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty a zároveň předpokládají snižující se efektivitu elektromagnetického stínění se zvyšující se frekvencí. Jak se však dalo předpokládat, žádná ze závislostí navržených matematických modelů neodpovídá přesně závislosti experimentálně zjištěných dat. Model (15) predikuje celkově vyšší účinnost stínění, než jaká byla zjištěna experimentálně a předpokládá jen velmi malý rozsah efektivity stínění. Model (16), stejně jako předchozí, předpokládá efektivitu elektromagnetického stínění vyšší, než ve skutečnosti je. Rozsah předpokládaných hodnot je však větší a závislost svým tvarem lépe odpovídá závislosti experimentálně zjištěných hodnot. Model (17) oproti výše zmíněným modelům predikuje celkovou účinnost stínění nižší, pro textilie s obsahem vodivé komponenty 20% a méně dokonce účinnost zápornou. Model (19) jako jediný využívá při výpočtu vodivost mědi. Výsledné hodnoty účinnosti stínění odpovídají experimentálně zjištěným hodnotám nejlépe ze všech vytipovaných modelů. Větší

rozdíly vykazují pouze u materiálů s velmi nízkým obsahem vodivé komponenty. Model je tedy vhodný pro predikci efektivity stínění pro vzorky, jejichž obsah vodivé komponenty je v oblasti nad perkolačním prahem. Model (20) predikuje velmi velký rozsah efektivity stínění, u materiálů s obsahem vodivé komponenty 5% a více se predikované hodnoty od skutečných vzdalují. Závislost modelu (21) má sice tvar podobný závislosti experimentálně zjištěných dat, model však předpokládá celkovou účinnost stínění v záporných číslech. Model (22) svým tvarem i predikovanými hodnotami velmi připomíná model (20), stejně tak i model (23), pouze s tím rozdílem, že poslední zmíněný predikuje pro materiály s obsahem vodivé komponenty 1 a 3% nižší efektivitu stínění než je ve skutečnosti. Poslední navržený matematický model, model (24), oproti ostatním uvedeným využívá při výpočtu povrchovou rezistivitu. Model predikuje velký rozsah účinnosti stínění. Celkově však předpokládá nižší hodnoty efektivity stínění, než jaké byly zjištěny experimentálně.

Zjištěné závislosti navržených matematických modelů odpovídaly závislostem experimentálně zjištěným svým tvarem, ne však hodnotami. Snahou bylo tedy optimalizovat konstanty modelů tak, aby si závislosti byly co nepodobnější. Optimalizace byla provedena v programu MATLAB metodou nejmenších čtverců. Po optimalizaci konstant odpovídala závislost predikovaných hodnot závislosti experimentálně zjištěných hodnot nejvíce u modelů (19) a (24). V případě modelu (19) byly optimalizovány tři konstanty. Optimalizovaný model (19) se se skutečnými hodnotami efektivity stínění výrazněji rozchází pouze u textilií s nízkým obsahem kovových vláken, konkrétně s obsahem 1% a 3%. U textilií s obsahem vodivé složky 5% a více jsou rozdíly mezi predikovanou a skutečnou hodnotou minimální. U modelu (24) byly optimalizovány dvě konstanty a stejně jako u předchozího optimalizovaného modelu i u tohoto jsou větší rozdíly mezi předpokládanými a skutečně naměřenými hodnotami pouze u textilií s obsahem vodivé složky menší než 5%. Je zřejmé, že modely jsou platné zejména pro oblast obsahu vodivé komponenty nad perkolačním prahem.

Všechny matematické modely založené na elektrických vlastnostech materiálu vychází z předpokladu, že stínicí přepážka je kompaktní materiál bez obsahu nespojitostí, jak již bylo zmíněno výše. Veškeré textilie jsou však charakteristické svými otvory v oblasti vazných bodů. Bylo zjištěno, že tyto otvory účinnost stínění elektromagnetického záření mohou výrazně snižovat, zejména při vyšších frekvencích.

Další část práce se proto zabývá studiem vlivu porozity tkanin. Porozita byla hodnocena s využitím obrazové analýzy. Obrazovou analýzou byly získány rozměrové charakteristiky, jejichž výsledky potvrzují, že velikost otvorů v oblasti vazných bodů závisí na obsahu vodivé komponenty. Se zvyšujícím se množstvím vodivé složky v textilií se zvyšují i geometrické rozměry otvorů v oblasti vazných bodů. V této části práce byly z pěti navržených modelů vybrány tři vhodné k dalšímu ověřování. Model (25) předpokládá, že efektivita stínění samotných otvorů se bude snižovat se zvyšujícím se množstvím vodivé komponenty v materiálu. To znamená, že větší otvory mají nižší účinnost stínění elektromagnetického záření. Model (26) predikuje také klesající účinnost stínění se zvyšujícím se obsahem vodivé složky, tedy většími otvory, ovšem v menší míře než předchozí model. Výjimkou je model (30), který s větším obsahem vodivé komponenty predikuje mírný nárůst účinnosti stínění samotných otvorů.

Poslední část práce se zabývá kombinací obou výše zmíněných přístupů. Vzorec navržený v rešeršní části práce pro kombinaci dvou modelů má za cíl dosáhnout přesnějšího výpočtu účinnosti stínění. Kombinován je vždy jeden z modelů pro stanovení efektivy stínění homogenní bariéry a jeden z modelů pro výpočet elektromagnetického stínění samotných otvorů v oblasti vazných bodů textilie. Jako jeden z nejvhodnějších modelů pro kombinování se jeví model (19), jehož závislost  $SE$  [dB] na obsahu vodivé komponenty  $P$  [%] dobře odpovídá závislosti experimentálně zjištěných hodnot a zároveň se vypočtené hodnoty liší od naměřených jen minimálně ve srovnání s ostatními modely. Ověřením bylo zjištěno, že kombinací modelu (19) pro výpočet efektivy stínění homogenní bariéry s modelem (26) pro výpočet účinnosti stínění samotných otvorů je získána závislost, která v bodě 2400 MHz odpovídá experimentálně zjištěným hodnotám. Kombinace těchto dvou modelů nejvíce odpovídá skutečnosti. Nejméně skutečnosti odpovídá kombinace s modelem (30). Modelované hodnoty se od experimentálně zjištěných ještě více vzdalují. Obdobná situace nastává i u druhého modelu, modelu (15), zvoleného pro ověření teorie kombinování modelů. Kombinace modelu (15) s modelem (26) opět nejvíce odpovídá experimentálně zjištěným hodnotám. Shoda je však menší než u modelu (19).

Problematika elektromagnetického stínění je v současné době velmi studovaným odvětvím, svědčí o tom velké množství prací publikovaných po celém světě. Parametr účinnosti elektromagnetického stínění je však často experimentálně hodnocen pomocí různých metodik a jak bylo zjištěno, výsledky měřené rozdílnými metodikami jsou

neporovnatelné. Navíc, přístrojové vybavení pracovišť pro přímé hodnocení je relativně finančně nákladné. Práce byla proto zaměřena na výzkum v oblasti možností nepřímého stanovování stínící efektivity, které je založeno na znalosti snadno měřitelných charakteristik. Ověřeno bylo několik přístupů a bylo dosaženo velmi uspokojivých výsledků. Vytipované modely jsou snadno aplikovatelné a využitelné i pro textilie odlišného materiálového složení.

## Použitá literatura

- [1] DUQUESNE, S.; MAGNIEZ, C.; CAMINO, G. *Multifunctional Barriers for Flexible Structures*. Berlin : Springer-Verlag, 2007. 302 s. ISBN 0933-033X.
- [2] WHITE, D. *A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compoatibility*, Vol.5, Don White Consultants, Germantown, MD, 1971.
- [3] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vysoké učení technické v Brně, 2000. 1198 s. ISBN 80-214-1869-9.
- [4] MÍČEK, P.; *Nejnovější poznatky o specifických účincích různých druhů elektromagnetického záření na živé organismy*. Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity. Brno, 2007.
- [5] SANCAK, E., et al. An investigation of elektromagnetic shielding effectiveness of knitting fabrics with different metal wire. 46th International Congress IFTK. 2012.
- [6] VOJTĚCH, L.; NERUDA, M.; HÁJEK, J. Planar Materials Electromagnetic Shielding Efficiency Derivation. *International Journal on Communications Antenna and Propagation*. 2011, Vol. 1, No. 1, p. 21-28. ISSN 2039-5086.
- [7] LÓPEZ CARO, A. *Modeling of textile reiforced composite barriers against electromagnetic radiation*. Diplomová práce. Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze, 2011.
- [8] PERUMALRAJ, R. et al. Electromagnetic Shielding Effectiveness of Copppe Core-Woven Fabrics. *Journal of the Textile Institute*, 100(6), 2009, pp. 512–524.
- [9] SHINAGAWA, S., et al. Conductive Papers Containing Metallized Polyester Fibers for Electromagnetic Interference Shielding, *J. Porous Materials* 6. 1999, p. 185-190.



- [10] NOVÁK, J. TZB-info [online]. 2004 [cit. 2012-12-28]. Elektromagnetické pole a zdravotní rizika (I). Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/1801-elektromagneticke-pole-a-zdravotni-rizika-i>>.
- [11] DARMOVÁ, V. *Ionizujúce a neionizujúce žiarenie*. 2009. Brno: Tribun EU s.r.o, 2009. 82 s. ISBN 978-807399-814-1.
- [12] PEKÁREK, L., ŠÍSTEK, P., JELÍNEK, L. *Neionizující záření: expozice a zdravotní rizika*. 2006. Praha: Státní zdravotní ústav, 2006. 95s. ISBN 80-7071-276-7.
- [13] KUPKA, K., KUBINYI, J., ŠÁMAL, M., et al. *Nukleární medicína*. 1. vydání. 2007. 185 s. ISBN 978-80-903584-9-2.
- [14] MILITKÝ, J. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2002. 238 s. ISBN 80-7083-644-X.
- [15] VOJTĚCH, D. *Materiály a jejich mezní stavy*. Praha: VŠCHT, 2010, 212s. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [16] KÖNIG, H.; ERLACHER, P. *Neviditelná hrozba?: Elektromagnetická pole kolem nás*. HEL, 120 s. ISBN 80-86167-15-1.
- [17] GEETHA, S., et al. EMI shielding: Methods and Materials - A Review. *Journal of Applied Polymer Science*. 2009, 112, s. 2073-2086.
- [18] AL-SALEH, M.; SUNDARARAJ, U. Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites. *Carbon*, 47, 2009, pp. 1738-1746.
- [19] OTT, H. W. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., 2009, 843 s. ISBN 978-0-470-18930-6.

- [20] WANG, X.; LIU, Z. Influence of fabric density on shielding effectiveness of electromagnetic shielding fabric. *PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY* 88(2012), 11a, pp. 235-238.
- [21] HENN, A. R.; CRIBB, R. M. Modeling the Shielding effectiveness of Metallized Fabrics.
- [22] KODALI, V. P. *Engineering Electromagnetic Compatibility: Principles, Measurements and Technologies*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1996, 359 s. ISBN 0-7803-1117-5.
- [23] ZHANG, CH. et al. Electromagnetic Interference Shielding Effect of Nanocomposites with Carbon Nanotube and Shape Memory Polymer.
- [24] KAISER, K. L. *Electromagnetic Shielding*. Taylor&Francis, 2006, 336, ISBN 0-8493-6372-1.
- [25] CHEN, H. et al. Fabrication of Conductive Woven Fabric and Analysis of Electromagnetic Shielding via Measurement and Empirical Equation. *Journal of Materials Processing Technology*, 184(1-3), 2007, pp. 124–130.
- [26] ŠAFÁŘOVÁ, V.: Textilní materiály se zvýšenou elektrickou vodivostí. Technická univerzita v Liberci, 2010.
- [27] PETŘÍKOVÁ, A.: *Řešení problematiky odstínění elektromagnetického záření*. Diplomová práce. Fakulta textilní, TUL, 2012.
- [28] COTTET, D., et al. Electrical Characteriation of Textile Transmission Lines. *IEEE Transactions on Advanced Packing*. 2003, vol. 26, no. 2, s. 182-190.
- [28] HAŇKA, L. *Teorie elektromagnetického pole*. Praha : SNTL, 1982. 578 s.

[29] ČSN 34 1382. *Zkoušení elektrostatických vlastností materiálů a výrobků*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1989.

[30] FAJMON, B., RŮŽIČKOVÁ, I.: *Matematika 3*. Skripta FEKT VUT Brno. [online] 2003 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.rozhovor.cz/souvislosti/matematika3.pdf>>

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Typický model sinusové rovinné vlny .....	12
Obrázek 2: Typy bikomponentních vláken.....	21
Obrázek 3: Rovinná vlna dopadající na stínící přepážku <sup>[1]</sup> .....	22
Obrázek 4: Metoda otevřeného pole <sup>[17]</sup> .....	25
Obrázek 5: Metoda stíněného boxu <sup>[17]</sup> .....	26
Obrázek 6: Metoda stíněného prostoru <sup>[17]</sup> .....	26
Obrázek 7: Metoda koaxiálního vedení <sup>[17]</sup> .....	27
Obrázek 8: Sít'ovaná elektromagnetická bariéra <sup>[7]</sup> .....	33
Obrázek 9: Otvory v oblasti vazných bodů .....	37
Obrázek 10: a) původní snímek pořízený mikroskopem; b) šedo tónový obraz .....	38
Obrázek 11: a) binární obraz; b) odstranění příliš malých objektů .....	39
Obrázek 12: a) spojení blízkých objektů; b) odstranění objektů v okraj. oblastech .....	39
Obrázek 13: a) zakreslení na binárním obraze; b) zakreslení na původním snímku .....	40
Obrázek 14: Závislost průměrné šířky a výšky otvorů na obsahu vodivé komponenty .	42
Obrázek 15: Histogram rozdělení šířky u textilie s obsahem vodivé složky 75% .....	43
Obrázek 16: Porovnání závislostí (model (15)).....	45
Obrázek 17: Průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie podle modelu (15) .....	46
Obrázek 18: Porovnání závislostí (model (16)).....	47
Obrázek 19: Průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie podle modelu (16) .....	48
Obrázek 20: Porovnání závislostí (model (17)).....	49
Obrázek 21: Průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie podle modelu (17) .....	50
Obrázek 22: Porovnání závislostí (model (19)).....	51
Obrázek 23: Průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie podle modelu (19) .....	52
Obrázek 24: Porovnání závislostí (model (20)).....	53
Obrázek 25: Průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie podle modelu (20) .....	54
Obrázek 26: Porovnání závislostí (model (21)).....	55
Obrázek 27: Průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie podle modelu (21) .....	56
Obrázek 28: Porovnání závislostí (model (22)).....	57
Obrázek 29: Průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie podle modelu (22) .....	58
Obrázek 30: Porovnání závislostí (model (23)).....	59
Obrázek 31: Průběh účinnosti stínění pro jednotlivé textilie podle modelu (23) .....	60
Obrázek 32: Porovnání závislostí (model (24)).....	61
Obrázek 33: Metoda nejmenších čtverců <sup>[30]</sup> .....	62
Obrázek 34: Porovnání závislostí (optimalizovaný model (19)).....	64
Obrázek 35: Průběh účinnosti stínění podle optimalizovaného modelu (19).....	65
Obrázek 36: Porovnání závislostí (optimalizovaný model (24)).....	66
Obrázek 37: Účinnost stínění otvorů v závislosti na obsahu vodivé komponenty .....	67
Obrázek 38: Účinnost stínění otvorů v závislosti na frekvenci .....	68
Obrázek 39: Kombinace modelu (19) s modelem (25) 1.....	70
Obrázek 40: Kombinace modelu (19) s modelem (25) 2.....	71
Obrázek 41: Kombinace modelu (19) s modelem (26) 1.....	72

Obrázek 42: Kombinace modelu (19) s modelem (26) 2.....	73
Obrázek 43: Kombinace modelu (19) s modelem (30) 1.....	74
Obrázek 44: Kombinace modelu (19) s modelem (30) 2.....	75
Obrázek 45: Kombinace modelu (15) s modelem (25) 1.....	76
Obrázek 46: Kombinace modelu (15) s modelem (25) 2.....	77
Obrázek 47: Kombinace modelu (15) s modelem (26) 1.....	78
Obrázek 48: Kombinace modelu (15) s modelem (26) 2.....	79
Obrázek 49: Kombinace modelu (15) s modelem (30) 1.....	80
Obrázek 50: Kombinace modelu (15) s modelem (30) 2.....	81

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Elektromagnetické spektrum <sup>[4]</sup> .....	14
Tabulka 2: Měrný elektrický odpor vybraných vláken <sup>[14]</sup> .....	17
Tabulka 3: Specifikace vzorků .....	34
Tabulka 4: Elektrické vlastnosti .....	35
Tabulka 5: Experimentálně zjištěné hodnoty SE .....	36
Tabulka 6: Výsledky obrazové analýzy 1 .....	41
Tabulka 7: Výsledky obrazové analýzy 2 .....	43
Tabulka 8: Hodnoty SE vypočtené podle modelu (15).....	45
Tabulka 9: Hodnoty SE vypočtené podle modelu (16).....	47
Tabulka 10: Hodnoty SE vypočtené podle modelu (17).....	49
Tabulka 11: Hodnoty SE vypočtené podle modelu (19).....	51
Tabulka 12: Hodnoty SE vypočtené podle modelu (20).....	53
Tabulka 13: Hodnoty SE vypočtené podle modelu (21).....	55
Tabulka 14: Hodnoty SE vypočtené podle modelu (22).....	57
Tabulka 15: Hodnoty SE vypočtené podle modelu (23).....	59
Tabulka 16: Hodnoty SE vypočtené podle modelu (24).....	61
Tabulka 17: Výsledné hodnoty kombinace modelů (19) a (25) .....	69
Tabulka 18: Výsledné hodnoty kombinace modelů (19) a (26) .....	71
Tabulka 19: Výsledné hodnoty kombinace modelů (19) a (30) .....	73
Tabulka 20: Výsledné hodnoty kombinace modelů (15) a (25) .....	76
Tabulka 21: Výsledné hodnoty kombinace modelů (15) a (26) .....	78
Tabulka 22: Výsledné hodnoty kombinace modelů (15) a (30) .....	79

## **Přílohy**

## Příloha 1: Skript pro obrazovou analýzu textilie s obsahem vodivé složky 75%

```
PLOCHA=[];
BOUNDING=[];
POCET=[];

for i=1:10
I=imread(['P' num2str(i) '.jpg']);
figure, imshow(I)
Ig=rgb2gray(I);
%figure,imshow(Ig), hold on

T=graythresh(Ig);
Ibw=im2bw(Ig,T);
%figure,imshow(Ibw)

se=ones(21);
x=bwareaopen(Ibw,200);
%figure, imshow(x);
III=imclose(x,se);
%figure, imshow(III);
j=imclearborder(III);
%figure,imshow(j);

[L, pocet] = bwlabel(j);
PROPER=regionprops(L,'Area','BoundingBox');
allArea = ([PROPER.Area]);allBound = (cat(1, PROPER.BoundingBox));
%figure,imshow(Ig), hold on
for ii=1:length(allBound)

rectangle('Position',[allBound(ii,1),allBound(ii,2),allBound(ii,3),all
Bound(ii,4)],'EdgeColor','g')
end

PLOCHA=[PLOCHA;allArea];
BOUNDING=[BOUNDING;allBound];
POCET=[POCET;pocet];
end

figure,hist(PLOCHA,20)
a=BOUNDING(:,3);
b=BOUNDING(:,4);
figure,hist(a,20)
figure,hist(b,20)
N=mean(POCET);
A=mean(a);
B=mean(b);
A1=A*2.142;
B1=B*2.142;
A2=min(a);
B2=min(b);
A3=A2*2.142;
B3=B2*2.142;
c=sqrt(a.^2+b.^2);
C=max(c);
```

```
C1=C*2.142;
Area=mean(PLOCHA);
P=Area*(2.142^2);

x=a*2.142;
figure,hist(x,20)
grid on
xlabel('Šířka [μm]', 'FontSize', 14)
ylabel('Počet', 'FontSize', 14)

CP=Area*pocet
porozita=(100*CP)/1392648
```



## Příloha 2: Skript pro výpočet modelu (15)

```
ro=load('rV.txt');
f=250:20:2400;
T=load('tloustka.txt');
t=T.*1e-1

vyslSE=[];

for i=1:9

    SE=50+10.*log10(ro(i).*f).^(-1)+1.7.*t(i).*(f./ro(i)).^(1/2);
    vyslSE=[vyslSE;SE];

end

vyslSE;

SE24=vyslSE(:,108)

plot(f,vyslSE(1,:), '-.r', 'LineWidth', 2.5)
hold on
plot(f,vyslSE(2,:), '-.m', 'LineWidth', 2.5)
plot(f,vyslSE(3,:), '-.g', 'LineWidth', 2.5)
plot(f,vyslSE(4,:), '-.b', 'LineWidth', 2.5)
plot(f,vyslSE(5,:), '-.c', 'LineWidth', 2.5)
plot(f,vyslSE(6,:), '-.k', 'LineWidth', 2.5)
plot(f,vyslSE(7,:), '-.y', 'LineWidth', 2.5)
plot(f,vyslSE(8,:), '-.m', 'LineWidth', 2.5)
plot(f,vyslSE(9,:), '-.g', 'LineWidth', 2.5)
legend('75', '60', '40', '20', '15', '10', '5', '3', '1')

grid on
xlabel('Frekvence [MHz]', 'FontSize', 14)
ylabel('SE [dB]', 'FontSize', 14)

figure
P=load('P.txt');
SEex24=load('SEex24.txt');
plot(P, SE24, '*r')
hold on
plot(P, SEex24, '*b')

grid on
xlabel('Obsah vodivé komponenty P [%]', 'FontSize', 14)
ylabel('SE [dB]', 'FontSize', 14)
legend('predikce', 'experiment')
```

### Příloha 3: Skript pro výpočet modelu (24)

```
ro=load('rS.txt');
SE=42.5-20.*log10(ro);

figure
P=load('P.txt');
SEex24=load('SEex24.txt');
plot(P,SE,'*r')
hold on
plot(P,SEex24,'*b')

grid on
xlabel('Obsah vodivé komponenty P [%]','FontSize',14)
ylabel('SE [dB]','FontSize',14)
legend('predikce', 'experiment')
```

## Příloha 4: Skript pro optimalizaci modelu (19)

```
ro=load('rV.txt');
Kc=5.82E+5;
K=1./ro;
f=250:20:2400;
f1=2400
T=load('tloustka.txt');
t=T.*1e-1
y=load('SEex24.txt')

x1=log10(Kc.*f1./K);
x2=t.*sqrt(K./Kc.*f1);

z = [ones(size(x1)) x1 x2];
p=regress(y,z)

vyslSE=[];

for i=1:9
    SE=p(1)+p(2).*log10(Kc.*f./K(i))+p(3).*t(i).*sqrt(K(i)./Kc.*f);
    vyslSE=[vyslSE;SE];
end

vyslSE;

SE24=vyslSE(:,108)

figure
P=load('P.txt');
SEex24=load('SEex24.txt');
plot(P,SE24,'*r')
hold on
plot(P,SEex24,'*b')

grid on
xlabel('Obsah vodivé komponenty P [%]','FontSize',14)
ylabel('SE [dB]','FontSize',14)
legend('predikce', 'experiment')
```

## Příloha 5: Skript pro optimalizaci modelu (24)

```
rS=load('rS.txt');
x=log10(rS);
y=load('SEex24.txt');
p=polyfit(x,y,1);
P=load('P.txt');

A=p(1)
B=p(2)

SE=A*log10(rS)+B;

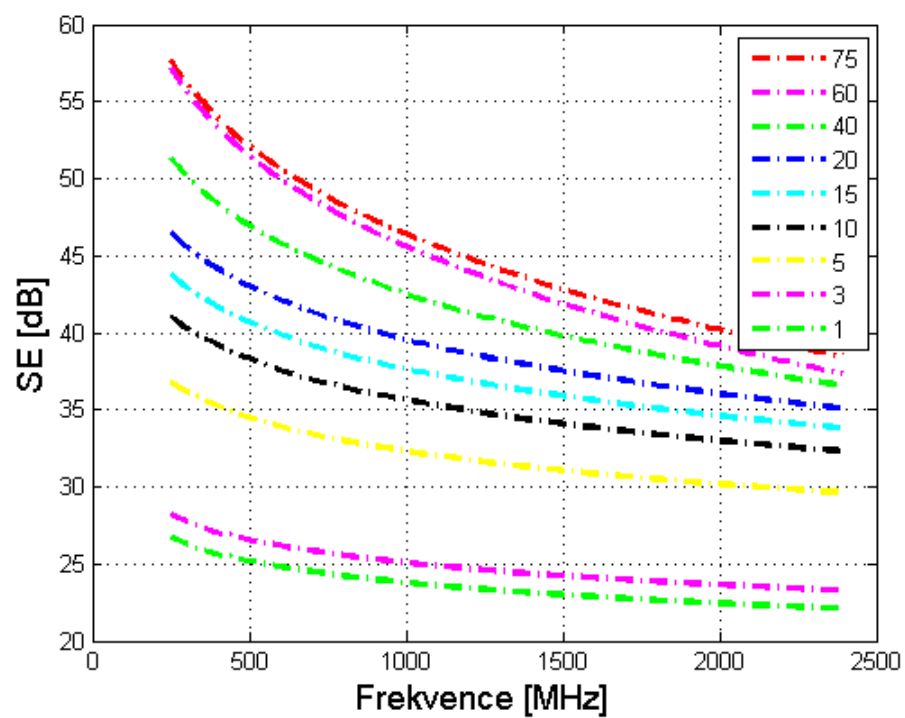
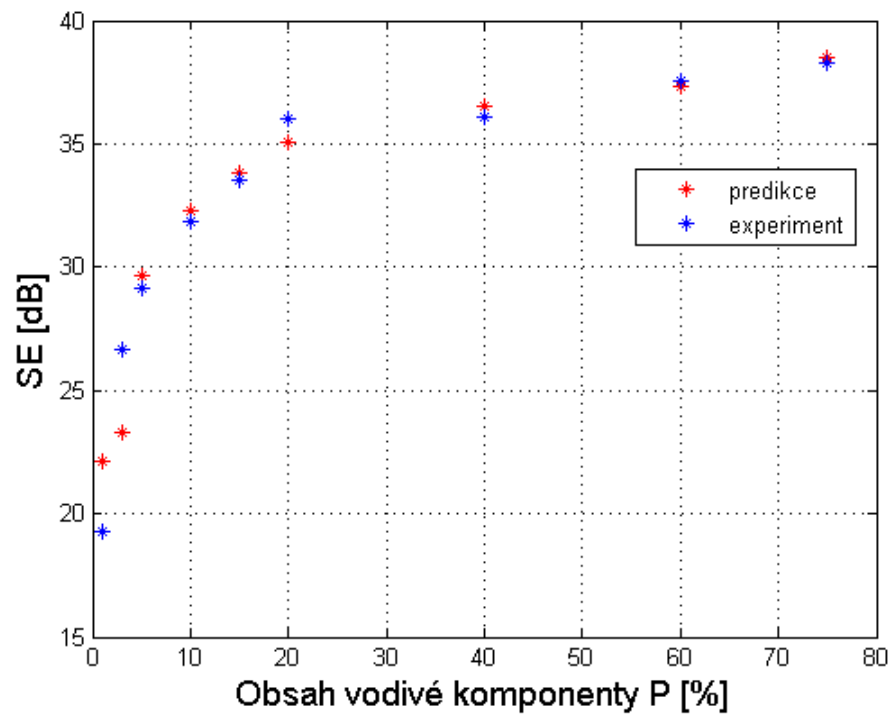
figure
plot(P,y,'*r')
hold on
plot(P,SE,'*b')

grid on
xlabel('Obsah vodivé komponenty P [%]','FontSize',14)
ylabel('SE [dB]','FontSize',14)
legend('predikce', 'experiment')
```

## Příloha 6: Optimalizace modelů

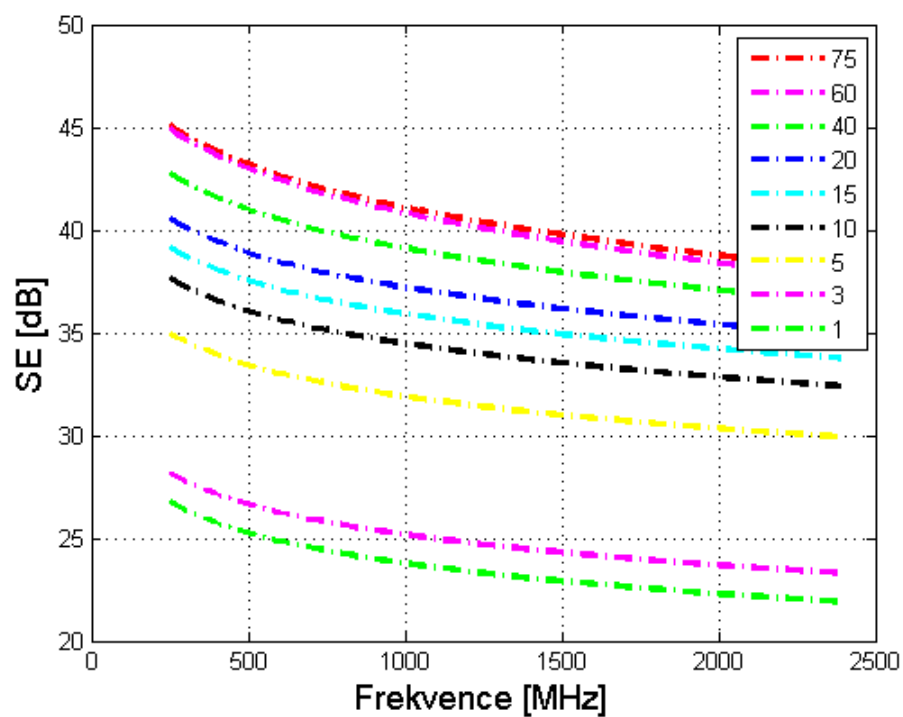
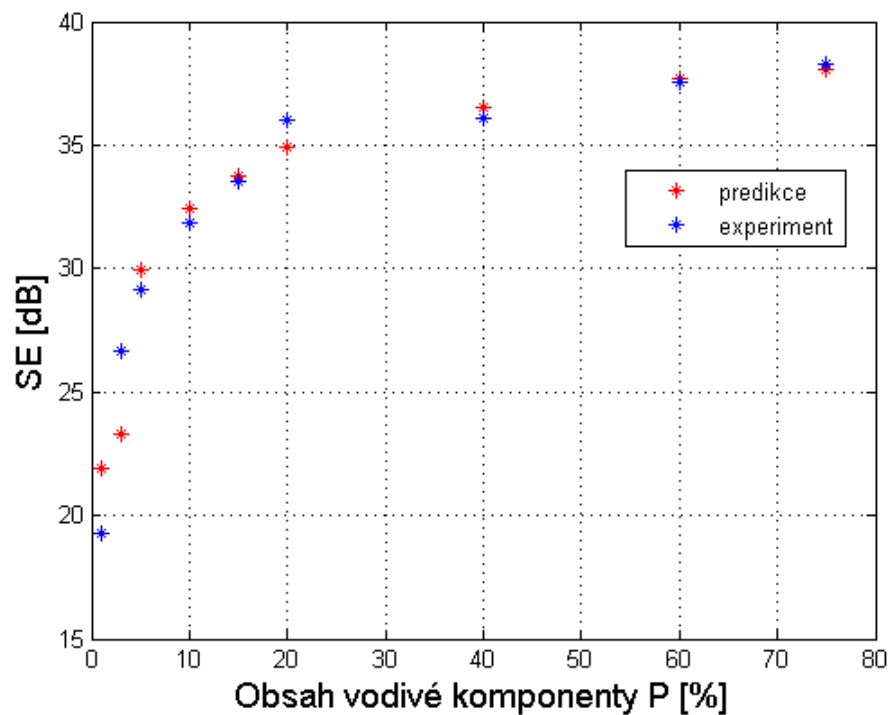
### Model (15)

Konstanta	Nová hodnota
$x_1$	-21,3246
$x_2$	458,9124
$x_3$	-142,1997



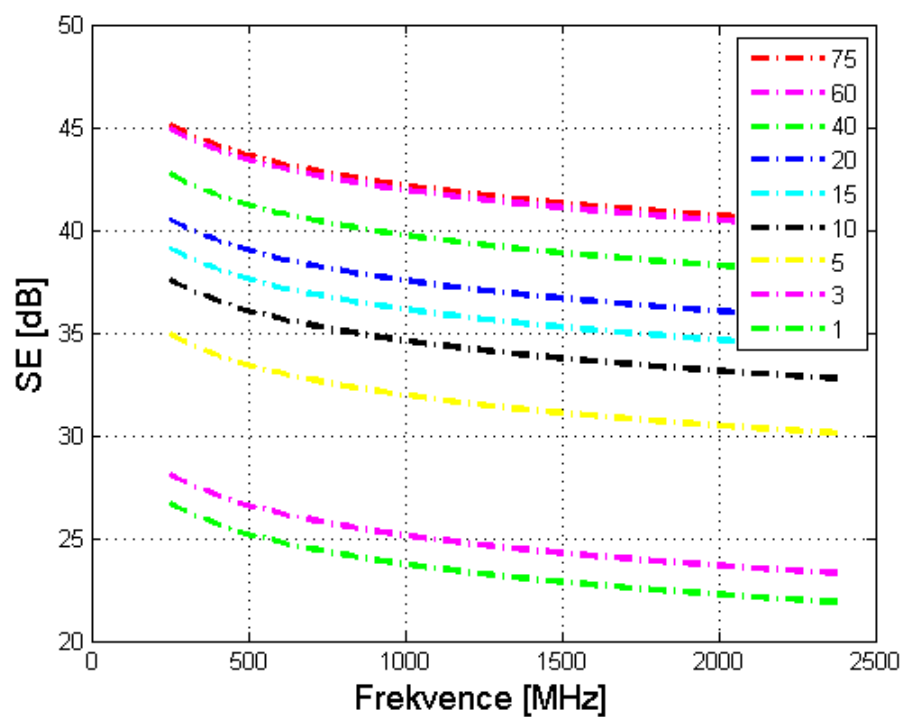
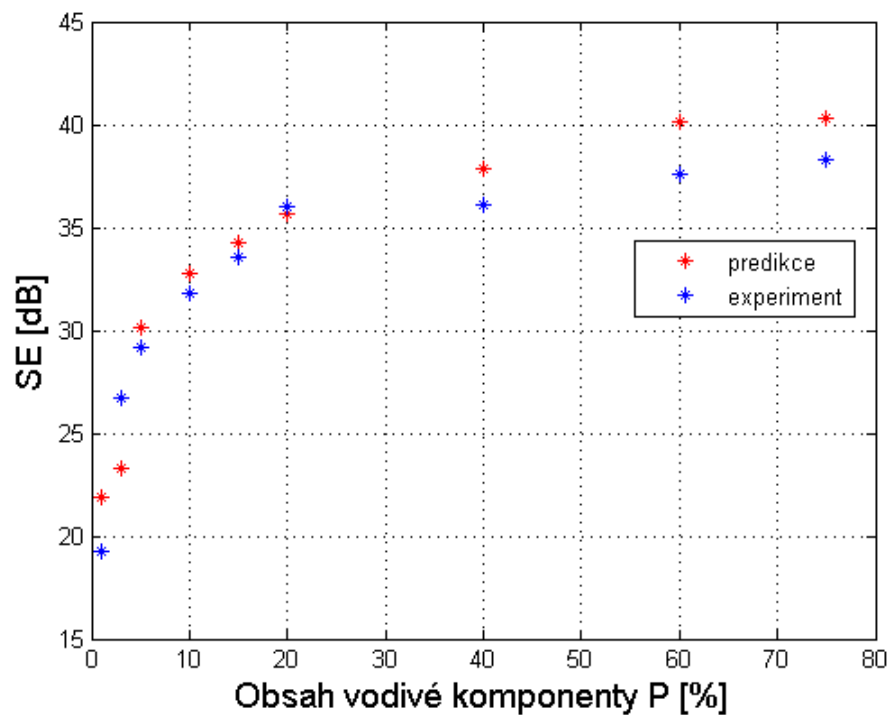
**Model (16)**

Konstanta	Nová hodnota
$x_1$	$1,0e+004 * 0,0045$
$x_2$	$1,0e+004 * (-0,0005)$
$x_3$	$1,0e+004 * (-4,0828)$



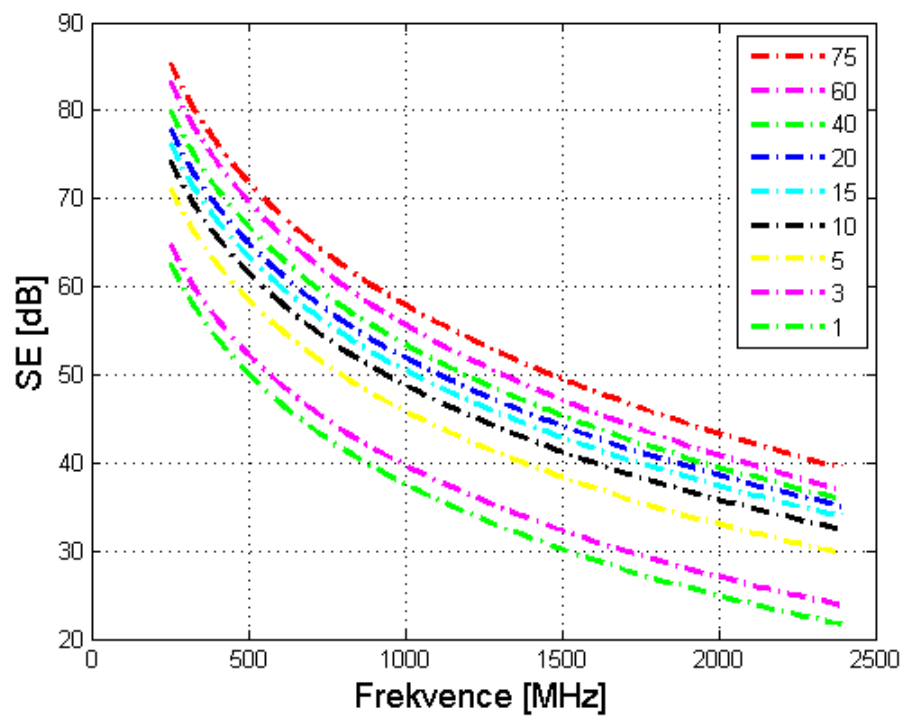
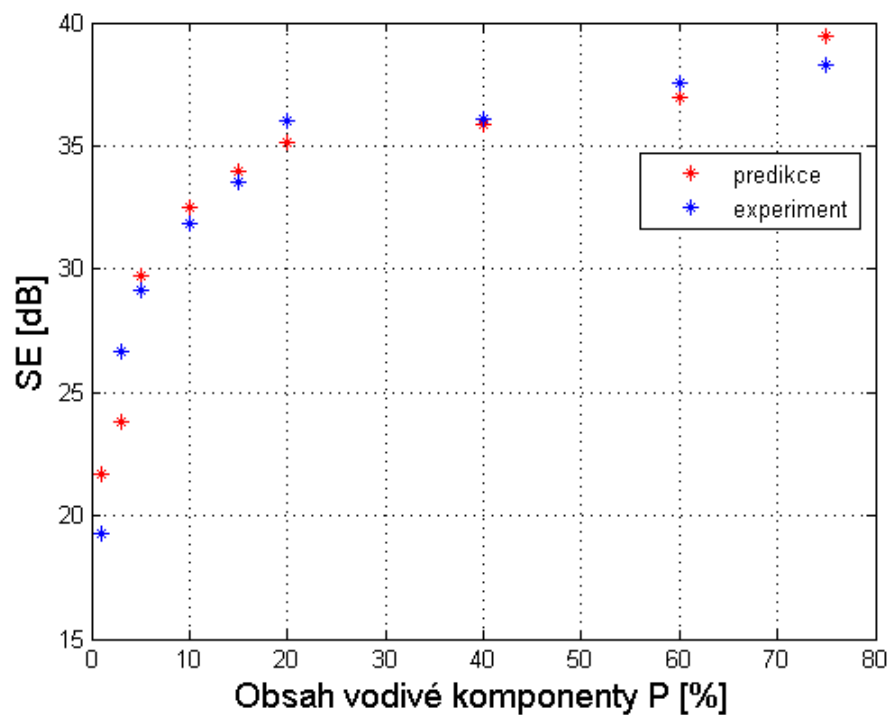
**Model (17)**

Konstanta	Nová hodnota
$x_1$	$1,0e+003 * 0,0360$
$x_2$	$1,0e+003 * 0,0098$
$x_3$	$1,0e+003 * (-2,3034)$



**Model (20)**

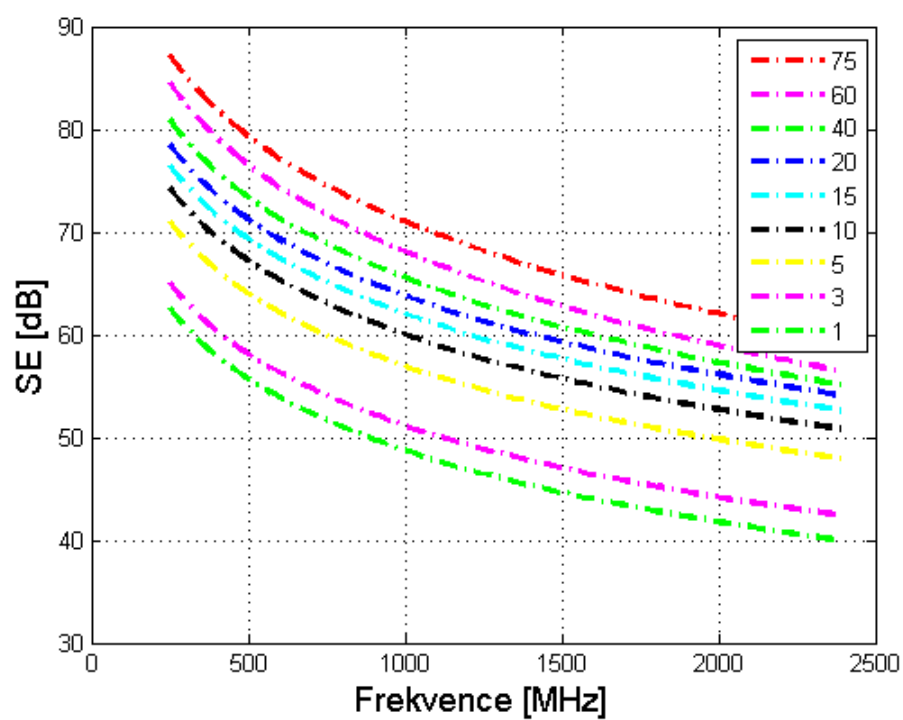
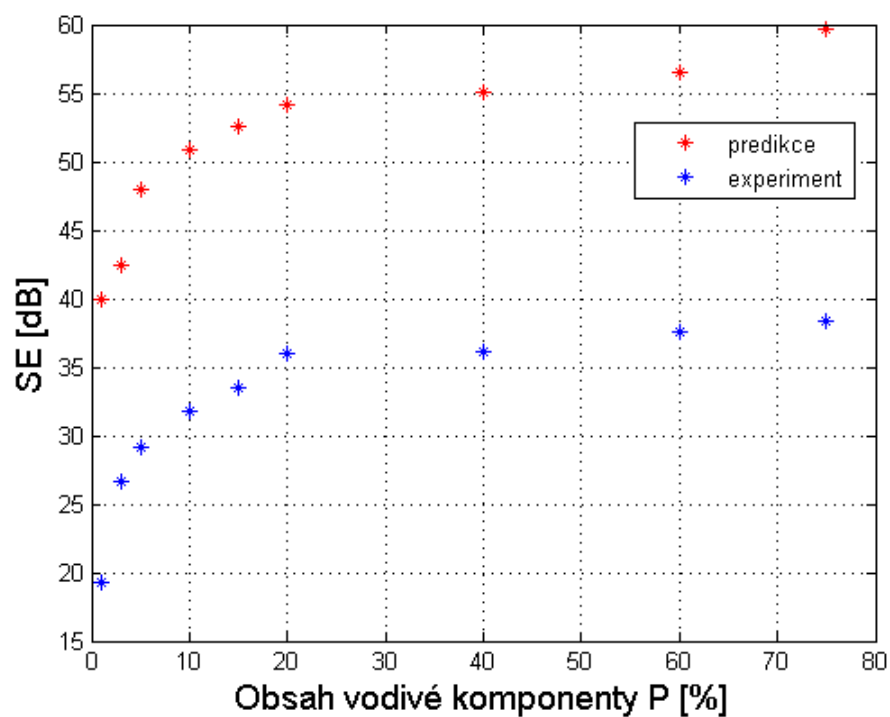
Konstanta	Nová hodnota
$x_1$	$1,0e+004 * (-0,0031)$
$x_2$	$1,0e+004 * (-0,0023)$
$x_3$	$1,0e+004 * (-9,2854)$
$x_4$	$1,0e+004 * (-0,0037)$





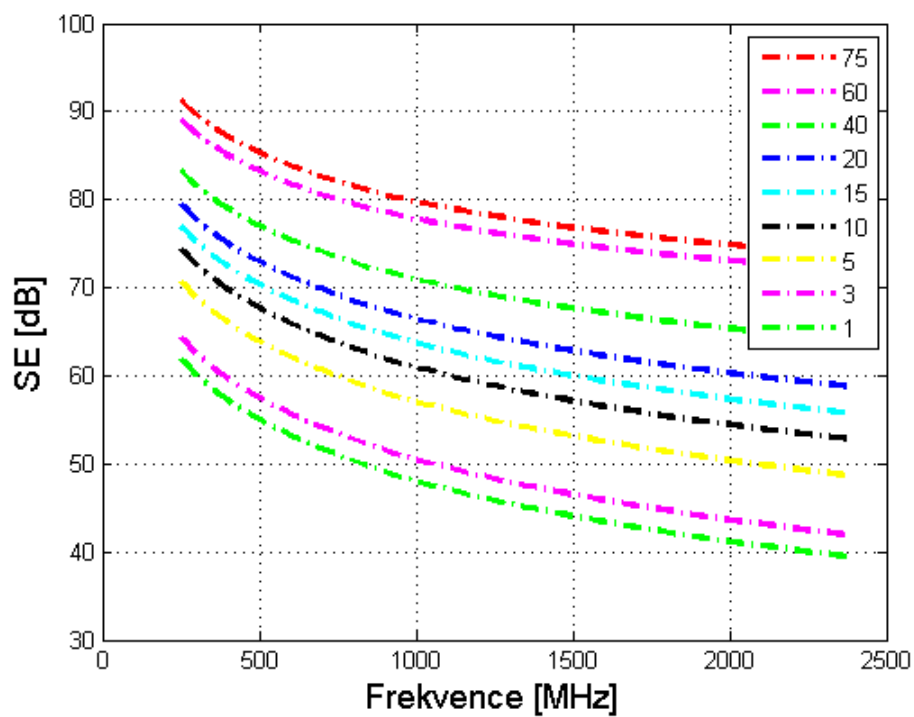
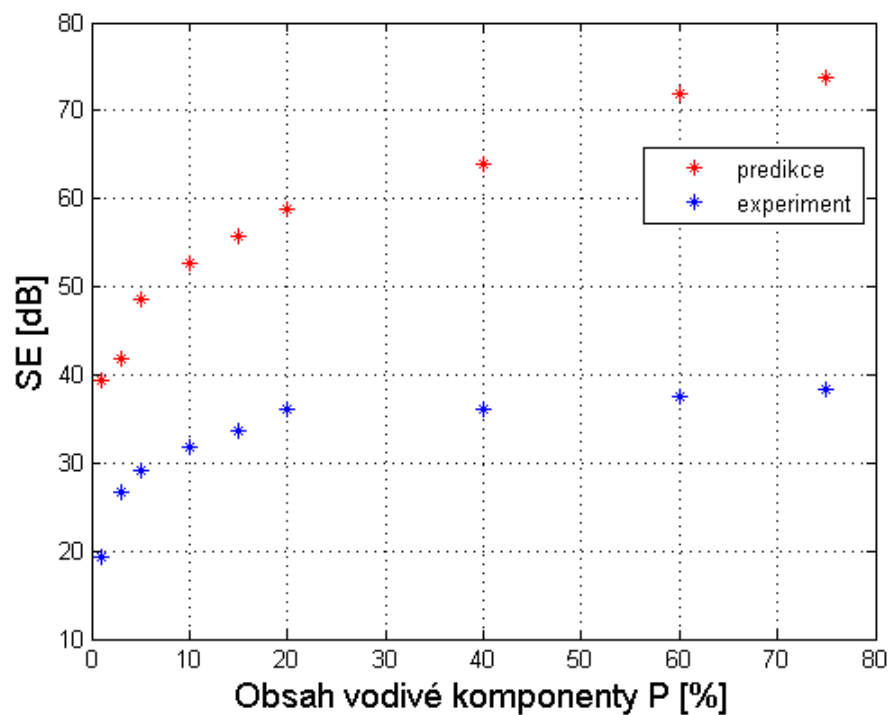
**Model (21)**

Konstanta	Nová hodnota
$x_1$	$1,0e+004 * (-0,0023)$
$x_2$	$1,0e+004 * (0,0023)$
$x_3$	$1,0e+004 * (-5,2148)$
$x_4$	$1,0e+004 * (-0,0037)$



**Model (22)**

Konstanta	Nová hodnota
$x_1$	$1,0e+004 * (-0,0031)$
$x_2$	$1,0e+004 * (0,0023)$
$x_3$	$1,0e+004 * (-9,2853)$
$x_4$	$1,0e+004 * (-0,0037)$



**Model (23)**

Konstanta	Nová hodnota
$x_1$	$1,0e+004 * (-0,0068 + 0,0050i)$
$x_2$	$1,0e+004 * (-0,0023 - 0,0000i)$
$x_3$	$1,0e+004 * (-9,2544 - 0,0000i)$
$x_4$	$1,0e+004 * (-0,0037 - 0,0000i)$

